



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI SPORTOVNÍ STŘELBY

SHOOTING SPORT SIMULATION DEVICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Poloch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Martin Poloch

ID: 164368

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro simulaci sportovní střelby

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete elektronické zařízení pro simulaci sportovní střelby pomocí laserových technologií. Najděte vhodný způsob snímání laserových paprsků s ohledem na spolehlivost a cenu. Modul do zbraně simulující výstřel navrhnete tak, aby byl snadno použitelný v různých typech zbraní a bez zásahu do kostry použité zbraně. Modul pro snímání střelby (terč) navrhnete tak, aby byl multifunkční, lehce přenositelný s možností vzájemné komunikace tzn., aby bylo možno střílet na více terčů v rámci jednoho střeleckého režimu. V rámci diplomové práce také vytvořte aplikaci pro sběr, ukládání a zobrazení střeleckých výsledků. Navržené zařízení otestujte a vyhodnoťte dosažené parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 22. 5. 2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.




doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je navrhnout zařízení, které bude simulovat sportovní střelbu. Návrh je zaměřen na vysokou konkurenceschopnost na trhu zábavních zařízení pro širokou veřejnost, tedy zejména na nízkou cenu. Dalšími důležitými aspekty jsou bezpečnost, spolehlivost a multifunkčnost celého systému. Simulace je postavena na speciální technologii snímání laserových paprsků pomocí LED vyvinuté v autorově bakalářské práci. Systém je řízen skupinou mikrokontrolérů, jejichž chod a komunikace jsou stěžejními částmi práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

LASER, světelné senzory, střelba, sportovní střelba, biatlon, moderní pětiboj, LED, návrh DPS, bezdrátová komunikace, nRF24L01+, návrh 3D objektů, jazyk C, programování, mikrokontrolér, ATmega

ABSTRACT

The goal of this diploma thesis is to design a shooting sport simulation device. Output of this project should be a market competitive product therefore the design should be focused on low price. Other important aspects are safety, reliability and multifunctionality of the whole system. Shooting simulation is based on special technology of sensing laser beams with LED developed in author's bachelor thesis. The system is controlled by a group of microcontrollers. Their program running and communication is a key part of this thesis.

KEYWORDS

LASER, light sensing, shooting, shooting sport, biathlon, modern pentathlon, LED, PCB design, wireless communication, nRF24L01+, 3D object design, C language, programming, microcontroller, ATmega

Bibliografická citace:

POLOCH, M. *Zařízení pro simulaci sportovní střelby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Zařízení pro simulaci sportovní střelby jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné
infrastruktuře

vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

1	Teoretická část	15
1.1	Analýza existujících zařízení	15
1.2	Bezpečnost laseru	18
1.2.1	Třída bezpečnosti 1	19
1.2.2	Třída bezpečnosti 1M	20
1.2.3	Třída bezpečnosti 1C	20
1.2.4	Třída bezpečnosti 2	21
1.2.5	Třída bezpečnosti 2M	21
1.2.6	Třída bezpečnosti 3R	22
1.2.7	Třída bezpečnosti 3B	22
1.2.8	Třída bezpečnosti 4	22
1.2.9	Výběr třídy bezpečnosti pro laser v tomto projektu	23
1.3	Elektronické snímání světla	24
1.3.1	Pole fotodiod.....	25
1.3.2	Pole fototranzistorů.....	26
1.3.3	Kombinace senzoru a optických prvků.....	26
1.3.4	Obrazové snímače	27
1.3.5	Pole LED.....	29
1.4	Historie projektu	32
1.4.1	Prototyp terče 1	32
1.4.2	Prototyp terče 2 – Veronika	33
1.4.3	Prototyp terče 3 – Gabriela	34
1.4.4	Prototyp terče 4 – Rachel.....	38
1.4.5	Prototypy zbraní.....	39
2	Praktická část	41
2.1	Volba vhodné měřicí LED	41
2.2	Návrh terče.....	43

2.2.1	Návrh snímacího pole a volba mikrokontroléru	43
2.2.2	Napájecí obvody	46
2.2.3	Řízení společné anody	48
2.2.4	Komunikace na hardware úrovni	50
2.2.5	Programování, programovací piny	51
2.2.6	Návrh DPS	52
2.2.7	Návrh krabičky	52
2.2.8	Firmware terče	53
2.2.9	Kalibrace terče na okolní jas.....	54
2.3	Návrh modulu do zbraně.....	56
2.3.1	Snímání otřesů	56
2.3.2	Napájení	59
2.3.3	Nabíjecí obvod k akumulátoru.....	60
2.3.4	Řízení laserové diody.....	61
2.3.5	Návrh DPS	62
2.3.6	Návrh krabičky	62
2.3.7	Firmware modulu do zbraně	63
2.3.8	Kalibrace na novou zbraň	63
2.4	Návrh kontrolního modulu.....	65
2.4.1	Displej a zvukový modul	65
2.4.2	Wi-Fi server	66
2.5	Komunikace	68
2.5.1	Protokol jednodrát.....	68
2.5.2	Komunikace terč – kontrolní modul, jednodrát	70
2.5.3	Bezdrátová komunikace.....	70
2.5.4	Komunikace terč – zbraň	72
2.5.5	Komunikace kontrolní modul – zbraň	74
2.5.6	Komunikace terč – kontrolní modul, bezdrátově.....	75
2.6	Průběh střelby, střelecké režimy.	76

2.7	Měření proudového odběru.....	80
2.7.1	Zbraňový modul.....	80
2.7.2	Modul terče	81
2.7.3	Kontrolní modul.....	82
2.8	Zařízení na trhu	83
3	Závěr	85
	Literární Zdroje	86

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>MCU</i>	Microcontroller unit,	Mikrokontrolér
<i>LED</i>	Light emitting diode,	Světlo emitující dioda
<i>IR</i>	Infrared,	Infračervený
<i>DPS/PCB</i>	Printed circuit board	Deska plošných spojů
<i>AEL</i>	Accessible emission limit,	Maximální dovolená hodnota výkonu.
<i>THT</i>	Trough – hole technology,	Technologie montáže skrz desku
<i>GPIO</i>	General purpose input/output,	digitální vstupní / výstupní pin
<i>SPI</i>	Serial peripheral interface,	Sériové rozhraní pro periferie
<i>SMD</i>	Surface mount device ,	Zařízení pro povrchovou montáž
<i>RAM</i>	Random-access memory,	
<i>SRAM</i>	Serial random-access memory,	
<i>IC</i>	Integrated circuit,	Integrovaný obvod
<i>ISM</i>	Industry, scientific and medical radio bands,	Rádiová vysílací pásma pro průmysl, vědu a medicínu
<i>IoT</i>	Internet of things,	Internet věcí
<i>USB</i>	Universal serial bus,	Univerzální sériová sběrnice
<i>CB</i>	Control board,	Kontrolní modul
<i>ADC</i>	Analog – digital converter,	Analogově – digitální převodník
<i>EEPROM</i>	electrically erasable programmable read-only memory,	
<i>HTML</i>	Hypertext markup language	Jazyk hypertextových označení
<i>CSS</i>	Cascading style sheets	Kaskádové styly
<i>JSON</i>	JavaScript object notation	Notace javascriptových objektů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Sofistikovanější terč společnosti LaserLyte (převzato z [1]).	15
Obrázek 2: Základní terč společnosti Laser Ammo (převzato z [2]).	16
Obrázek 3: Biatlonový terč od firmy APEOM (převzato z [4]).	17
Obrázek 4: Laserový zářič ve tvaru náboje a jeho umístění ve zbrani (převzato z [1]).	17
Obrázek 5: Graf AEL pro různé třídy bezpečnosti podle IEC 60825-1:2007 (převzato z [7]).	19
Obrázek 6: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1 (převzato z [8]).	20
Obrázek 7: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1M (převzato z [8]).	20
Obrázek 8: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1C (převzato z [8]).	21
Obrázek 9: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 2 (převzato z [8]).	21
Obrázek 10: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 2M (převzato z [8]).	21
Obrázek 11: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 3R (převzato z [8]).	22
Obrázek 12: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 3B (převzato z [8]).	22
Obrázek 13: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 4 (převzato z [8]).	23
Obrázek 14: Závislost voltampérové charakteristiky fotodiody na intenzitě osvětlení (převzato z [11]).	25
Obrázek 15: Lámání světelných paprsků spojnou čočkou do jejího ohniska (převzato z [13]).	27
Obrázek 16: Bayerova mřížka (převzato z [15]).	28
Obrázek 17: Diagram citlivosti LED na různé vlnové délky viditelného spektra (převzato z [16]).	29
Obrázek 18: Zapojení LED pro katodové snímání (převzato z [18]).	31
Obrázek 19: Schéma snímacího mechanismu Terče 1 (převzato z [19]).	32
Obrázek 20: Fotografie prototypu laserového terče Veronika.	34
Obrázek 21: Zjednodušené schéma zapojení LED na snímací mikrokontrolér Atmega8 (převzato z [19]).	36
Obrázek 22: Třetí prototyp Gabriela, porovnání s velikostí finálního zařízení.	37
Obrázek 23: Terčovnice s jedním aktivním prototypem terče Rachel.	39
Obrázek 24: Úprava zbraně pro prototyp terče 3 Gabriela	40

Obrázek 25: Atmega128A-AU v pouzdře TQFP64 (převzato z [21]).	45
Obrázek 26: Rozložení LED na jednom terči.	46
Obrázek 27: Schéma napájecího obvodu prototypu terče Lily	47
Obrázek 28: Návrh DPS pro zdroj s AMS1117	48
Obrázek 29: Proudový zesilovač pro řízení společné anody LED.	49
Obrázek 30: Zapojení snímacích LED.	50
Obrázek 31: Bezdrátový modul s nRF24L01+ (převzato z [23]).	51
Obrázek 32: Resetovací obvod pro nRF24L01+	51
Obrázek 33: USB ASP (převzato z [24]).	52
Obrázek 34: Návrh krabičky pro modul terče.	53
Obrázek 35: Pružinový a kuličkový senzor otřesu (převzato z [25]).	57
Obrázek 36: Zapojení elektretového mikrofону.	58
Obrázek 37: Příklad grafu průběhu napětí na mikrofону v čase.	58
Obrázek 38: Akumulátor použitý v modulu do zbraně (převzato z [27]).	60
Obrázek 39: Nabíjecí obvod pro akumulátor v modulu do zbraně.	61
Obrázek 40: Obvod pro řízení laserové diody.	62
Obrázek 41: Návrh krabičky modulu do zbraně.	63
Obrázek 42: Schéma zapojení displeje v kontrolním modulu.	66
Obrázek 43: Zvukový modul WTV-020-SD (převzato z [28]).	66
Obrázek 44: Schéma zapojení bezdrátového modulu ESP8266.	67
Obrázek 45: Komunikace pomocí protokolu jednodrát.	69
Obrázek 46: Formát paketu při bezdrátové komunikaci (převzato z [23]).	72
Obrázek 47: Přihlašovací sekvence pro komunikaci terč – zbraň.	73
Obrázek 48: Formát komunikace při výstřelu a kontrole připojení.	74
Obrázek 49: Přihlašovací sekvence pro komunikaci kontrolní modul – zbraň.	75
Obrázek 50: Část komunikace mezi terčem a kontrolní modulem.	76
Obrázek 51: Jednoduchý set zbraň – zbraňový modul – terč.	77
Obrázek 52: Výsledná podoba jednoho z možných prodejních setů.	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: AEL pro třídy 1 a 3R v závislosti na délce trvání záření.....	24
Tabulka 2: Počet snímacích LED v závislosti na počtu prstenců v terči.	44
Tabulka 3: Seznam adres pro bezdrátovou komunikaci v terči a ve zbrani.....	71
Tabulka 4: Střelecké režimy a jejich nastavení.....	78
Tabulka 5: Střelecké režimy pro terče.	79
Tabulka 6: Proudový odběr v různých stavech zbraňového modulu.....	81
Tabulka 7: Proudový odběr v různých stavech modulu terče.....	81
Tabulka 8: Proudový odběr různých stavů v kontrolním modulu.	82
Tabulka 9: Výrobní náklady a prodejní ceny za kus při výrobě 10 a 1000 kusů.....	83

ÚVOD

Tato diplomová práce vznikla s cílem vytvořit kompletní elektronické zařízení, které bude simulovat sportovní střelbu. Jako vhodná technologie pro splnění takového úkolu byla vybrána „střelba laserem“. To znamená, že na jedné straně systému je modul, který je schopen vysílat laserový paprsek (zbraň) a na straně druhé je modul snímající dopadající laserové paprsky (terč).

Takový systém má několik benefitů ve srovnání se střelbou z klasických zbraní. Nejdůležitější výhodou je celková bezpečnost střelby. Práce s lasery má sice také svá úskalí, ale ve srovnání s klasickými zbraněmi jsou ty laserové nesrovnatelně bezpečnější (při vhodně zvoleném laseru). Dále je možné využít elektronického potenciálu zařízení a vyrobit systém, který je multifunkční a může simulovat několik různých verzí střelby nebo využít elektronické prvky k zatraktivnění požitku ze střelby.

Sportovní střelba je také velmi nákladné odvětví a její převod do elektronické podoby ji může výrazně zlevnit. U střelby jsou velkou částí nejen pořizovací, ale zejména provozní náklady. Střelci vystřílejí za svou kariéru desítky i stovky tisíc nábojů a při ceně náboje od 1 Kč po 20 Kč se musí zohlednit i tento aspekt. Provozní náklady „laserové střelby“ jsou v tomto ohledu zanedbatelné. V neposlední řadě má tento typ střelby také ekologické výhody. S klasickou střelbou jsou spojeny náklady na likvidaci vystřelených nábojů a výstřely často také produkují potenciálně škodlivé plyny.

Hlavní vizí celého projektu je zpřístupnit střelecké sporty široké veřejnosti. Tento cíl je sice nad rámec diplomové práce, ale již při návrhu zařízení je s ním nutné počítat. Aby mohla být vize naplněna, je nutné vytvořit robustní a konkurenceschopné zařízení. Z toho tedy plynou další návrhové požadavky, jako například provádět celý návrh s ohledem na výslednou cenu zařízení, využívat levné a spolehlivé součástky, vyrobit podklady pro automatizovanou sériovou výrobu, tedy například využít v co největší míře technologii SMD, vytvořit přívětivé uživatelské rozhraní, atraktivní obal a další.

Finální zařízení pak může najít uplatnění i v jiných oblastech. Mohlo by konkurovat sportovním zbraním stejně jako pouťové střelbě ze „vzduchovky“, airsoftu, paintballu, lasergame, elektronickým šipkám a může sloužit jako doprovodný program na festivalech, ve školách, ve volnočasových centrech a v dalších oblastech zábavního průmyslu.

Práce je rozdělena do dvou stěžejních částí. V teoretické části je provedena analýza podobných či konkurenčních zařízení, vysvětlena bezpečnost laserů a jsou v ní popsány stěžejní použité technologie. Praktická část se pak zabývá návrhem, výrobou, testováním a měřením kompletního zařízení.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část této práce má za úkol shrnout všechny poznatky související s laserovou střelbou. Je zde provedena analýza existujících zařízení, a to vyrobených konkurencí i autorem projektu. Teoretická část také obsahuje informace o bezpečnosti laserů a možnostech pro snímání světelných, respektive laserových paprsků.

1.1 Analýza existujících zařízení

Návrhem, výrobou a prodejem zařízení pro laserovou střelbu se v dnešní době zabývá několik desítek společností. Některé z nich sídlí i v České republice. Pokud chceme vytvořit konkurenceschopné zařízení, je nutné rozebrat přednosti a nedostatky existujících zařízení, poučit se z nich a zvolit ideální cestu, kterou by se návrh měl ubírat.

První významnou společností je firma LaserLyte, sídlící v USA. V jejich internetovém obchodě lze najít několik různých nabízených terčů, zbraní i celých setů. Zařízení nejsou přímo určena pro sportovní střelbu, ale spíše pro trénink techniky střelby obecně. Nedostatkem je zde malá odolnost proti okolnímu osvětlení, což znamená, že terče na silnějším světle přestávají fungovat. Ke snímání se pravděpodobně využívají LED, kterými se také zobrazují trefená místa. Dalším důležitým aspektem je cena. Nejlevnější terče, které nabízejí pouze možnost zjistit, jestli byl terč trefen nebo ne (hit/miss terče) stojí okolo 3000 Kč a sofistikovanější terče s určením místa zásahu (viz obrázek 1) lze koupit za 8000 Kč. I tyto terče jsou stále velmi jednoduché oproti představám o návrhu terčů pro tuto práci. [1]



Obrázek 1: Sofistikovanější terč společnosti LaserLyte (převzato z [1]).

Další americkou firmou je Laser Ammo. Zaměření i cenové hladiny odpovídajících úrovní terčů jsou velmi podobné jako u předešlé společnosti. Obrázek 2 zobrazuje jeden z terčů této společnosti. Firma Laser Ammo navíc nabízí i komplexnější a preciznější systémy pro sportovní střelbu s cenami i vysoce přes 10 000 Kč. [2]



Obrázek 2: Základní terč společnosti Laser Ammo (převzato z [2]).

I v Evropě lze nalézt firmy vyrábějící systémy pro simulaci střelby. Jejich zařízení jsou téměř výhradně určena pro sportovní střelbu a to jak pro trénink, tak pro samotné závody. Závodní terče musí být velice přesné a spolehlivé a jejich cena šplhá k desítkám tisíců korun. Typickými představiteli jsou firmy Hora systemtechnik z Rakouska [3] a česká firma APEOM, která poskytla systém pro první použití laserové střelby na Olympijských hrách v roce 2012 v Londýně. [4] Zde se ke snímání používají různé specializované fotocitlivé senzory a v nejpřesnějších terčích kamerové moduly. Z osobních konzultací a zkušeností vyplynulo, že tyto subjekty mají tak úzký profil zákazníků, že vyrábí pouze několik stovek kusů stejných terčů, mají tedy mnohonásobně vyšší náklady na výrobu než při automatizované výrobě a tomu odpovídá i vysoká prodejní cena. Jeden z terčů pro amatérské závody v biatlonu od společnosti Apeom je zobrazen na obrázku 3.



Obrázek 3: Biatlonový terč od firmy APEOM (převzato z [4]).

Všechny tyto existující systémy využívají ke „střílení“ červené laserové zářiče. Firmy většinou nabízejí možnost koupit si jejich kompletní laserovou zbraň. Jako alternativu vyrábějí laserové zářiče ve tvaru nábojů, které střelec zasune do hlavně nebo do komory a může s jejich pomocí střílet z vlastní zbraně (viz obrázek 4). V zářiči bývá senzor otřesu, který zareaguje při výstřelu zbraně a vyšle laserový puls. Velkou část zářiče zabírají knoflíkové baterie. Díky rozměrovým omezením zde není místo pro složitější elektronické obvody a jedná se tedy o velice jednoduchý systém obsahující jen několik málo nezbytných součástek.



Obrázek 4: Laserový zářič ve tvaru náboje a jeho umístění ve zbrani (převzato z [1]).

Všechna tato zařízení jsou cílena na relativně úzkou skupinu zákazníků, tedy střeleckých nadšenců, kteří jsou ochotni za tento sport či koníček zaplatit tisíce i desetitisíce korun. Tím je tedy velmi omezena velikost trhu. Pro rozšíření trhu je nutné snížit cenu na úroveň, která je snesitelná pro širokou veřejnost. Tato cenová hladina je velmi proměnlivá a různá v jiných geografických oblastech. Lze ji přirovnat k ceně nejlevnějších dostupných chytrých telefonů, tedy v České republice se tato hladina pohybuje mezi dvěma a třemi tisíci korun.

Jediný subjekt, kterému se podařilo pořizovací náklady na laserovou střelbu snížit na takovou úroveň je startup iTarget. Ten zvolil velmi rozdílný přístup oproti ostatním. Laserový paprsek se nesnímá pomocí terče, ale promítá se na statický terč. Na něj je namířena kamera chytrého telefonu nebo tabletu, která snímá odražené paprsky, a s její pomocí se zaznamenávají střelecké výsledky. Díky tomu se této firmě podařilo jako první překonat zmíněnou cenovou hranici. V Americe se tento set prodává v přepočtu za 2000 Kč. Nutnost vlastnit chytrý telefon s kvalitní kamerou se v dnešní době již nejspíš nedá považovat za nevýhodu, ale nutnost vlastnit zbraň ano. Startup totiž nevyrábí vlastní zbraně jako jiné firmy, ale poskytuje pouze již zmíněný „laserový náboj“. Opět se tedy jedná o zacílení převážně na lidi, kteří se střelbě již věnují. [5]

Zařízení tedy můžeme rozdělit do 3 kategorií – pro profesionální sportovce, pro střelecké nadšence a pro širokou veřejnost. V Evropě je „vysoká konkurence“ v první kategorii, ale ve druhé a třetí je konkurence nulová. Na tyto kategorie tedy bude zaměřen návrh zařízení v této práci a nejlépe tedy tak, aby poskytl hodnotu pro obě kategorie zároveň.

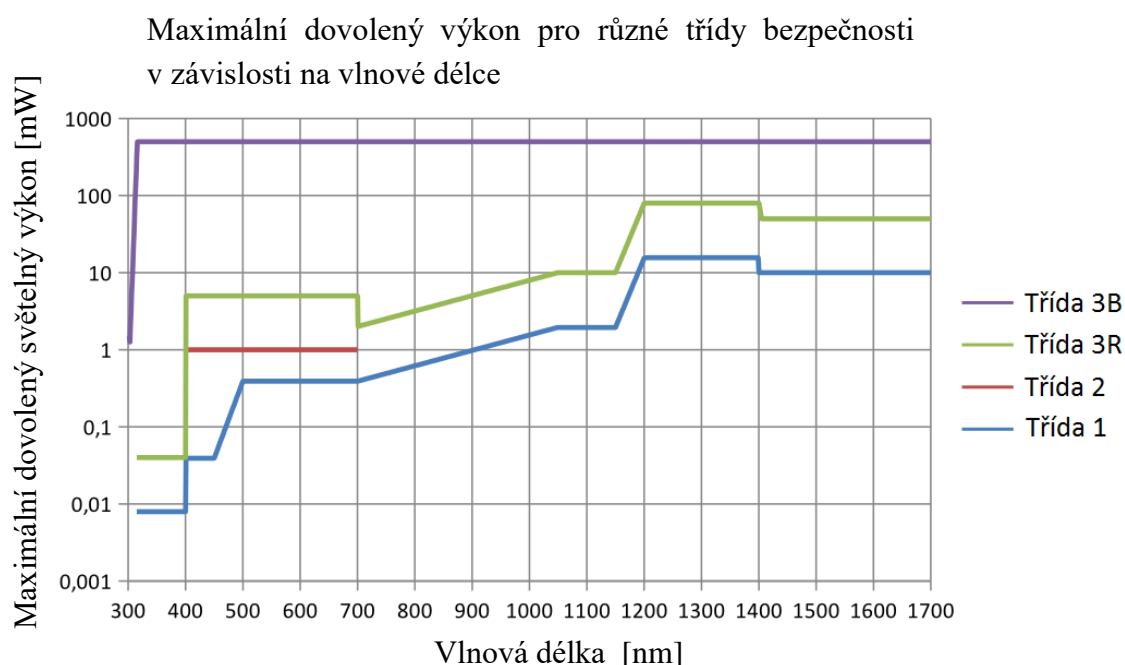
Znatelný nedostatek, který mají snad všechna zmíněná zařízení, je fakt, že terče popřípadě řídicí centrum střeleckého systému nezjistí výstřel, kterým se střelec vůbec netrefil do terče. Při zásahu terče logicky informaci o tom, že bylo vystřeleno, dostane řídicí centrum díky světelnému senzoru, ale pokud laser žádný senzor nezasáhne, taková informace chybí. Existují výjimky, kde jsou i mimo oblast určenou pro zásah umístěné další senzory na snímání „nezásahů“, ale stále se jedná o omezenou oblast. V této práci je cílem vytvořit multifunkční zařízení i pro „špatné“ střelce, a tedy je nutné tuto informaci o výstřelech, které minuly terč, poskytnout.

1.2 Bezpečnost laseru

V úvodu bylo zmíněno, že střelba laserem je velmi bezpečné řešení. To však platí pouze v případě správné volby použitého laseru. Lasery jsou klasifikovány podle normy do tříd bezpečnosti. Aktuální mezinárodní norma zabývající se bezpečností laserových produktů se jmenuje IEC 60825-1: 2014 Safety of laser products (Bezpečnost laserových produktů). Všechny produkty obsahující laser jsou řazené do jedné z osmi

tříd podle potenciální nebezpečnosti laserových paprsků. [6]

Klasifikace zohledňuje parametry jako je vlnová délka, vyzářený výkon respektive energie a pulzní charakter. Stěžejní parametr pro zařazení do správné třídy je maximální dovolená hodnota výkonu (AEL – accessible emission limit). Každá třída má své úrovně AEL závislé na vlnové délce, délce trvání záření a úhlu rozbíhavosti laserového svazku. Na obrázku 5 je pro názornost graf AEL pro 4 třídy v závislosti na vlnové délce záření podle normy z roku 2007 (která ještě nezahrnovala všechny aktuálně uvažované parametry). Všechny třídy mají předepsané označení, které musí být na laserovém zařízení uvedeno. Aktuální norma předepisuje 2 možné formy vysvětlujícího respektive varovného štítku a to slovní nebo symbolickou. Doporučená podoba štítků je zobrazena v kapitolách pro jednotlivé třídy na obrázcích 6 až 13. [8]



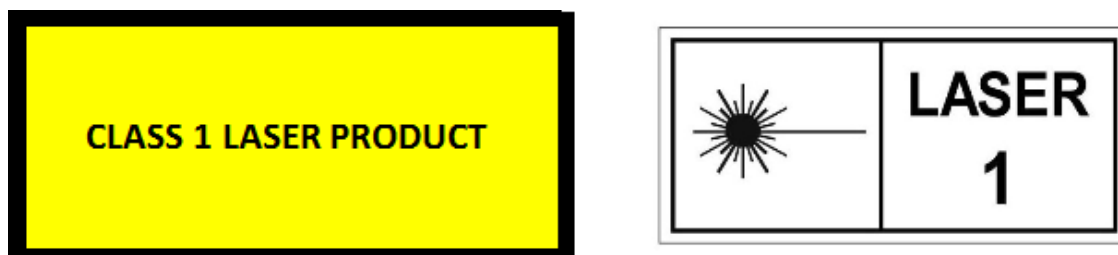
Obrázek 5: Graf AEL pro různé třídy bezpečnosti podle IEC 60825-1:2007 (převzato z [7]).

1.2.1 Třída bezpečnosti 1

Do třídy bezpečnosti 1 jsou zařazeny lasery, které za rozumně předpokládatelných podmínek používání neznámají žádné bezpečnostní riziko pro člověka. Pro tyto lasery platí, že i pokud se člověk dívá do paprsku nechráněným okem nebo dokonce přes optické přístroje jako dalekohled nebo mikroskop, nemůže mu paprsek způsobit žádnou újmu.

Také zde patří produkty obsahující laser vyšší třídy, ke kterému ale v běžném chodu není přístup. Jedná se například o laser v DVD nebo Blue-ray mechanice, která je v době svícení laseru uzavřena tak, že laserové paprsky nemohou mechaniku opustit. Laser uvnitř patří do třídy bezpečnosti 4, ale mechanika jako celek patří do třídy 1.

Lasery, které sami o sobě patří do třídy 1, nepotřebují žádné speciální označení, ale lasery, které jsou ve třídě 1 pouze díky zapouzdrazení, musí mít tuto informaci na sobě uvedeny v bezpečnostním štítku.



Obrázek 6: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1 (převzato z [8]).

1.2.2 Třída bezpečnosti 1M

Produkt ve třídě bezpečnosti 1M není nebezpečný při běžném používání bez použití dalších optických zařízení. Do této kategorie mohou být zařazeny lasery s vlnovou délkou mezi 302.5 nm a 4000 nm. Přidané písmeno M do názvu třídy značí, že se jedná o nebezpečí při zaostření záření (z anglického slova magnified). Většinou jde o přístroje, které obsahují optické prvky, které paprsek rozostří tak, že výkon, který dopadne na oko, nemůže způsobit jeho poškození. Jeho opětovné zaostření externí optikou by ale mohlo.

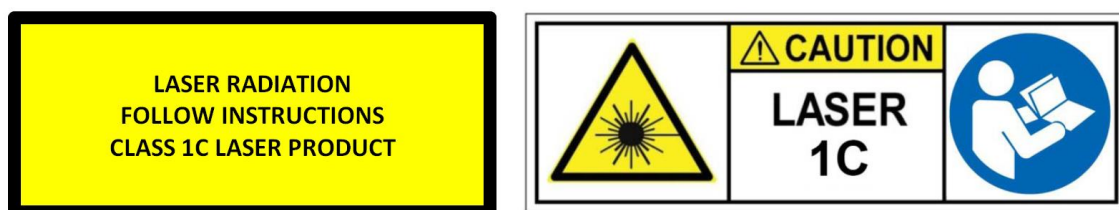


Obrázek 7: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1M (převzato z [8]).

1.2.3 Třída bezpečnosti 1C

Třída 1C je speciální kategorie zařazená do klasifikace v poslední aktualizaci normy IEC 60825–1. Do této třídy spadají zařízení, která jsou určena k přímému kontaktu s kůží nebo vnitřními tkáněmi v těle člověka pro lékařské, diagnostické nebo kosmetické procedury. Hodnota světelného výkonu použitých laserů může odpovídat

vyšším kategoriím, ale očnímu kontaktu je zabráněno konstrukcí zařízení. Tato zařízení pak nepodléhají tak přísné regulaci a testování jako zařízení vyšších tříd.

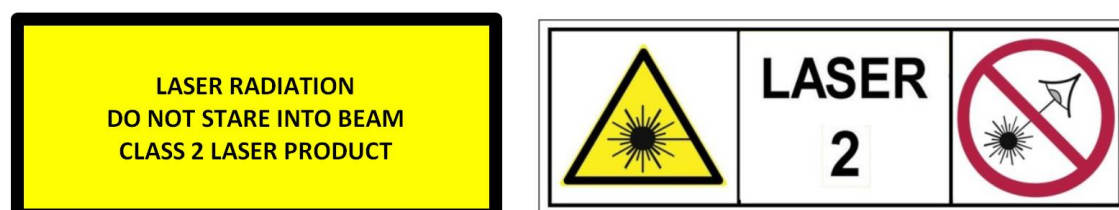


Obrázek 8: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 1C (převzato z [8]).

1.2.4 Třída bezpečnosti 2

Třída bezpečnosti 2 je omezena pouze na lasery s vlnovou délkou 400 až 700 nm, tedy na viditelné spektrum. Třída je dále omezena hodnotou AEL (admissible emission level, přípustná úroveň emise), která je pro tuto třídu 1 mW. S takovým výkonem je ochrana očí zajištěna pomocí mrkacího reflexu, který by se měl u zdravých lidí spustit do 0,25 s.

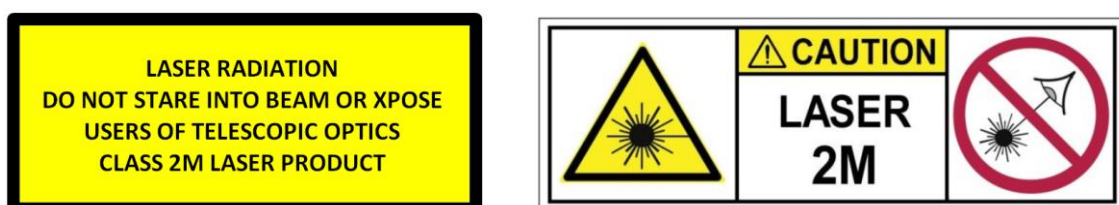
Oko vystavené laseru ve viditelném spektru po dobu kratší než 0,25 s by nemělo být poškozeno.



Obrázek 9: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 2 (převzato z [8]).

1.2.5 Třída bezpečnosti 2M

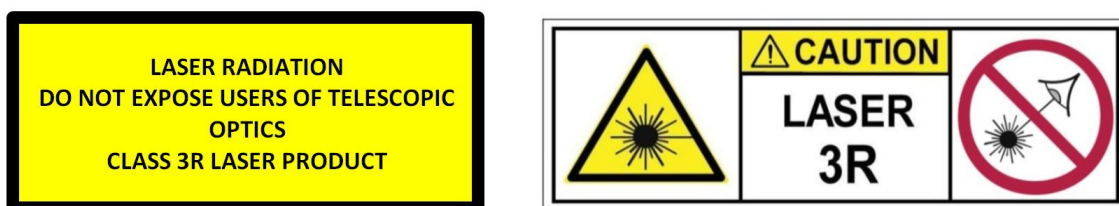
Pro třídu bezpečnosti 2M platí stejná omezení jako pro třídu 2 s tím, že zařízení mohou být stejně jako ve třídě 1M nebezpečná při používání optických přístrojů.



Obrázek 10: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 2M (převzato z [8]).

1.2.6 Třída bezpečnosti 3R

Zařízení ve třídě 3R již představuje jisté bezpečnostní riziko při přímém zásahu oka. Podle starší normy z roku 2007 je AEL třídy 3R ve viditelné oblasti spektra 5 krát větší než u třídy 2 (tedy 5 mW) a v oblasti mimo viditelné spektrum 5 krát větší než u třídy 1. Díky tomu může při přímém pohledu do paprsku dojít k pětinasobnému překročení bezpečné hodnoty dopadové energie, která je stanovena na $0,25 \text{ mJ/mm}^2$ za 0,25 s. Každý produkt patřící do třídy 3R opět musí mít varovný štítek s informací o tom, aby se uživatel vyhnul přímému zásahu oka.



Obrázek 11: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 3R (převzato z [8]).

1.2.7 Třída bezpečnosti 3B

Přímý pohled do zařízení ve třídě bezpečnosti 3B je vždy nebezpečný i při krátkých a nahodilých ozáření. Pozorování difúzních odrazů by mělo být bezpečné (norma stanovuje vzdálenost alespoň 13 cm od místa odrazu a dobu ozáření kratší než 10s). Při práci s lasery třídy 3B je nutné nosit ochranné pomůcky – brýle pro konkrétní vlnové délky.



Obrázek 12: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 3B (převzato z [8]).

1.2.8 Třída bezpečnosti 4

Všechny lasery, které nelze zařadit do bezpečnější kategorie patří do třídy bezpečnosti 4. Představují riziko nejen při ozáření očí, ale mohou poškodit také kůži popřípadě způsobit požár.



Obrázek 13: Bezpečnostní štítky pro třídu bezpečnosti 4 (převzato z [8]).

1.2.9 Výběr třídy bezpečnosti pro laser v tomto projektu

Pro závodní zařízení na sportovní střelbu jsou požadované lasery spadající do třídy bezpečnosti 1. Ty ale mají velice malý světelný výkon a je tedy složitější sestavit zařízení na jejich detekci. V této práci tedy bude nejpravděpodobněji použit laser spadající do třídy 3R, který je ve většině států tolerován k volnému prodeji. Do této třídy například spadají běžná laserová ukazovátka, na která se třeba v České republice nevztahují žádná omezení. Existují země, které povolují prodej zařízení s lasery o výkonu maximálně 1 mW jako například Austrálie. Tento trh tedy bude muset být v zájmu kvality snímání obětován.

Podle nové normy je hodnota AEL určena výpočtem, který zahrnuje i délku záření laseru a úhel rozbíhavosti laserových paprsků. Pro časy kratší než 250 ms je hodnota AEL větší než u předešlé normy. Například pro modrý laser o vlnové délce 415 nm, úhlu rozbíhavosti 1 mrad a době trvání laserového záření mezi 1 ms a 250 ms (typické hodnoty pro tento projekt) platí vztah pro maximální hodnotu dovoleného výkonu pro třídu bezpečnosti 3R

$$AEL_{3R} = \frac{3,5 * 10^{-3} * t^{0,75}}{t}, \quad (1)$$

Pro třídu 1 platí se stejnými hodnotami vztah

$$AEL_1 = \frac{7 * 10^{-4} * t^{0,75}}{t}, \quad (2)$$

kde AEL je hodnota maximálního dovoleného výkonu a t je doba trvání záření.

Tabulka 1 ukazuje vypočtené hodnoty AEL pro obě důležité třídy v závislosti na délce trvání záření (výstřelu). Z tabulky je patrné, že pro dobu trvání 250 ms, což je doba odpovídající ochrannému reflexu oka, platí prakticky stejné hodnoty jako v normě z roku 2007 (1 mW pro třídu 1 a 5 mW pro třídu 3R). Zkrácením laserového pulsu lze dosáhnout větší tolerance pro maximální výkon. Z těchto hodnot bude vycházet návrh laserového zářiče pro laserovou zbraň. [8]

Tabulka 1: AEL pro třídy 1 a 3R v závislosti na délce trvání záření

Délka trvání záření [ms]	AEL pro třídu 1 [mW]	AEL pro třídu 3 [mW]
1	3,94	19,68
2	3,31	16,55
5	2,63	13,16
10	2,21	11,07
15	2,00	10,00
20	1,86	9,31
30	1,68	8,41
40	1,57	7,83
50	1,48	7,40
100	1,24	6,22
150	1,12	5,62
200	1,05	5,23
250 a více	0,99	4,95

Ideální by bylo použít laser zařaditelný do třídy bezpečnosti 1, ale to přináší nezanedbatelné problémy s vývojem terče. Nízký výkon laseru přináší vysoké požadavky na citlivost terče. Jinými slovy, pokud bude použit laser o malém výkonu, bude problém jej na terči spolehlivě rozpoznat od okolního osvětlení, proto byl vybrán laser o výkonu 5 mW zařaditelný do třídy bezpečnosti 3R. Laser musí také být fyzicky malý, aby jej šlo implementovat do zbraně. Proto byly vybrány lasery ve formě polovodičové diody. Z hlediska bezpečnosti je toto kritérium nepodstatné.

1.3 Elektronické snímání světla

Stěžejní částí, kterou je třeba pro zařízení pro elektronickou střelbu vyvinout je systém na snímání laserového paprsku. Z předchozího výzkumu a zkušeností vyplynulo několik požadavků na parametry snímacího procesu. Ideálním řešením by byl senzor nebo senzory, které zabírají plochu podobnou používaným závodním terčům s velkou rozlišovací schopností, nízkou cenou, s vysokou odolností proti jakémukoliv jinému záření než je použitý laser ve zbraní, jednoduchým snímacím procesem a vysokou spolehlivostí. Takové senzory nalezeny nebyly, a proto bylo nutné z těch dostupných vybrat nejvhodnější kompromis mezi výše zmíněnými parametry.

Převod světelné energie na elektrickou je většinou proveden pomocí fotoelektrického nebo fotovoltaiického jevu. V obou dvou jevech dochází ke generaci

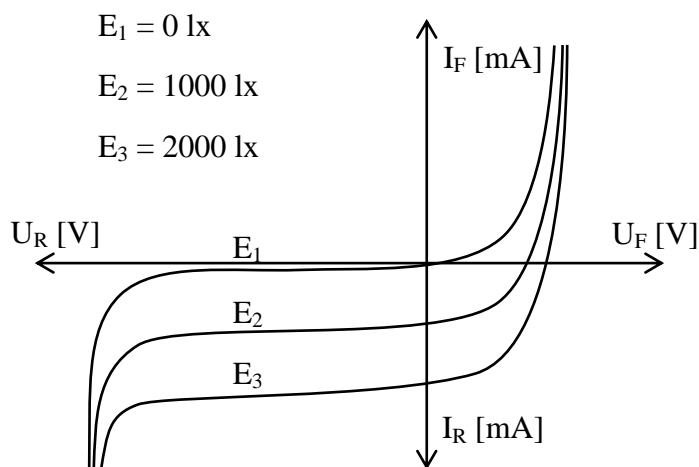
volných nosičů náboje způsobené dopadem fotonů o dostatečné energii. Tím vzniká v zasažených polovodičích elektrické pole respektive elektrický proud. [9]

Vzhledem k plánovanému použití celého zařízení byla stanovena maximální cena na celou snímací plochu při výrobě 1000 terčů na 100 Kč. V následující kapitole jsou postupně analyzovány nejperspektivnější možnosti.

1.3.1 Pole fotodiod

Fotodioda je polovodičová součástka, která je schopna pohltit světelnou energii a vygenerovat elektrický proud. Nejčastěji se jedná o polovodičové struktury PN a PIN (kde i znamená intrinsický polovodič). Fotodiody jsou navrženy tak, že správně operují při zapojení v závěrném směru, tedy že P část polovodiče je připojena na nižší potenciál, než část N. Konstrukcí je zařízení, že na PN respektive PIN přechod může dopadat okolní světelné záření. [10]

Voltampérové charakteristiky fotodiody jsou ve tmě téměř totožné s těmi od klasické polovodičové diody. Při nenulovém osvětlení se výrazně zvyšuje závěrný proud protékající fotodiodou (viz obrázek 14).



Obrázek 14: Závislost voltampérové charakteristiky fotodiody na intenzitě osvětlení (převzato z [11]).

Fotodioda se používá hlavně ve dvou zapojeních, a to hradlovém a odporovém. V hradlovém režimu se fotodioda chová jako zdroj napětí řízený intenzitou osvětlení. V odporovém režimu se využívá faktu, že proud protékající diodou je v tomto zapojení lineárně závislý na intenzitě osvětlení. [12]

Oba režimy mají své výhody a nevýhody obecně i vzhledem k použitelnosti v této práci. Při použití pole fotodiod je nevhodné, aby byly v obvodu další součástky pro každou fotodiodu, proto byl testován zejména hradlový režim. Systém fungoval

rychle a spolehlivě, ale jeho použití v této práci brání vysoká cena fotodiod. Vzhledem k tomu, že bylo nalezeno vhodnější řešení (viz dále), vývoj s pomocí fotodiod byl zastaven. Ze stejného důvodu bylo ukončeno i testování fotorezistorů.

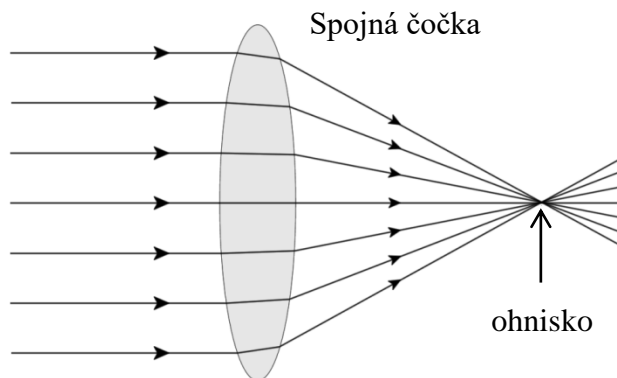
1.3.2 Pole fototranzistorů

Fototranzistor je velmi podobný bipolárnímu tranzistoru. Bázový proud je zde nahrazen světelným zářením. Při nárůstu intenzity dopadajícího záření na odhalený přechod PN se generují volné nosiče náboje, které způsobí zvětšení proudu mezi kolektorem a emitorem. V tomto projektu bylo úspěšně použito a testováno jiné zapojení, ve kterém je využito snížení odporu mezi kolektorem a emitorem při zvýšení intenzity osvětlení (viz dále).

Fototranzistor má v tomto projektu díky svým fyzikálně elektronickým parametrům víceméně shodnou použitelnost jako fotodiody. Velkou výhodou je ale cena. Například fototranzistor TESLA KP101 lze koupit za méně než 0.5 Kč za kus. Lze tedy z těchto prvků vytvořit pole o více než 100 kusech a stále bude splněna podmínka maximální ceny snímací plochy. Tento konkrétní fototranzistor byl úspěšně využit v prvním a druhém prototypu tohoto projektu.

1.3.3 Kombinace senzoru a optických prvků

Sestavit pole fotosenzitivních prvků znamená nutnost všechny tyto prvky obsluhovat. Proto vznikla tato možnost, kdy jeden terč představuje pouze jeden senzor. Součástkové senzory (fotodiody, fototranzistory, fotorezistory a další) nemají velikost snímací plochy větší než 1 cm^2 , a proto je nutné snímací plochu zvětšit dalšími mechanismy. V tomto projektu byl například využit fokusovací princip spojné optické čočky (viz obrázek 15). Rovnoběžné paprsky dopadající kolmo na spojnou čočku jsou lámány do jejího ohniska. Dostatečně vzdáleného střelce lze považovat za zdroj takovýchto paprsků. Je-li tedy v ohnisku čočky umístit fotosenzitivní prvek, jeho snímací plocha se zvětší právě na plochu čočky. Tato plocha už může být dostatečně velká pro vytvoření terče.



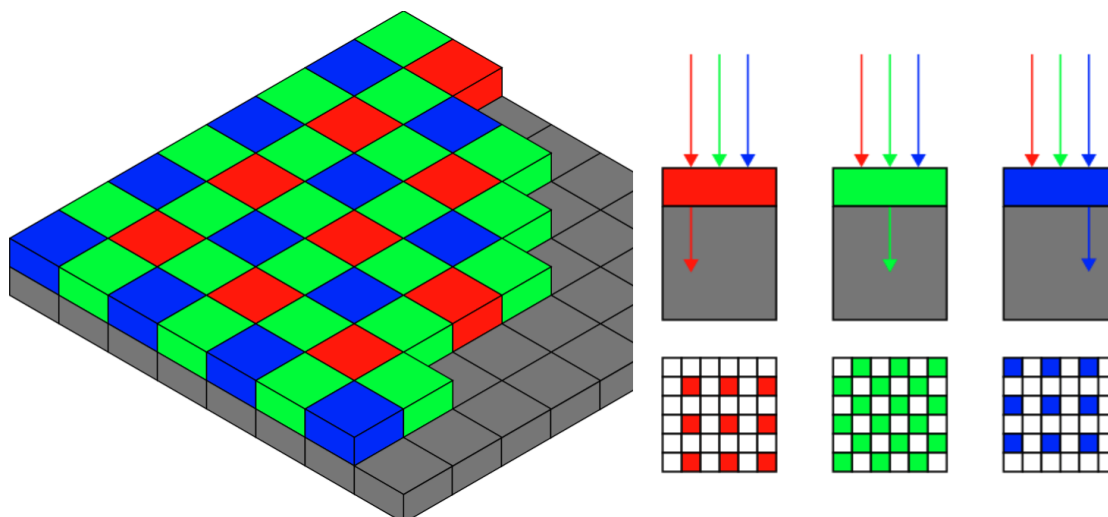
Obrázek 15: Lámání světelných paprsků spojnou čočkou do jejího ohniska (převzato z [13]).

Další možností je použití dostatečně citlivého snímacího prvku a difuzního skla, které rozptýlí dopadající laserové paprsky do celé komory terče, ve které je snímací prvek umístěn. Nevýhodami u tohoto řešení je nutnost kvalitního filtrování okolního osvětlení a neschopnost určit místo zásahu, ale pouze, jestli byl terč zasažen. Přesto je tento mechanismus velmi často používán pro závodní „hit/miss“ terče nižší kategorie. Jedná se o velmi levná řešení, a přesto jsou takové terče prodávány za částky přesahující 5 000 Kč.

1.3.4 Obrazové snímače

Obrazové snímače jsou dnes základní snímací prvek v kamerách, fotoaparátech, mobilních telefonech a dalších zařízeních pro zpracování obrazu. Zjednodušeně se jedná o pole fotodiod, které jsou velmi malé a jsou naskládány jedna vedle druhé. Pomocí řídicích a zpracovávajících obvodu pak dostáváme informaci o jasu na každé diodě. Existuje několik způsobů jak zrekonstruovat snímaný barevný obraz. [14]

Jedním ze způsobů je použití prolínajících se filtračních mřížek, které propouštějí pouze jednobarevné záření. Pro kompletní informaci o barvě je třeba získat alespoň tři různé monochromatické signály, nejčastěji RGB – červený, zelený a modrý. Pixely jsou většinou čtvercové, a proto se velmi často používá tzv. Bayerův systém rozložení filtrační mřížky, kdy ze čtyř sousedících pixelů tvořící čtverec jeden snímá červené světlo, jeden modré a zbylé dva zelené (viz obrázek 16). Takové rozložení nejlépe napodobuje vnímání světla lidským okem, které je také nejcitlivější právě na zelenou barvu. [15]



Obrázek 16: Bayerova mřížka (převzato z [15]).

Dalšími možnými rozloženými mřížek jsou mřížka CYGM (barvy azurová, žlutá, zelená a purpurová) a mřížka RGBE (červená, zelená, modrá a emeraldová). Existují i další způsoby rekonstrukce barevného obrazu jako například systém Color co-site sampling a Foveon X3. Color co-site sampling je snímací proces, kdy fyzický mechanismus hýbe s filtrační mřížkou o jeden pixel za jeden snímek a každá fotodiody tak má v dalším snímku jinou filtrační mřížku. Spojením několika snímků tak každý pixel získává informaci o barevnosti dopadajícího světla. [14]

Foveon X3 je systém snímacího senzoru, který je založen na různých délkách penetrace záření o různých vlnových délkách do křemíku. V různých hloubkách se pak měří úroveň prošlého světla, která odpovídá intenzitám různých barev. [17]

V dnešní době se používají 2 základní typy obrazových snímačů, a to CCD a CMOS. Systémy se principiálně liší hlavně ve způsobu přenosu signálu ze snímače do obvodu pro zpracování. Oba typy se neustále vyvíjejí a každý má své výhody a oblasti, ve kterých je nejvhodnější k použití. [14]

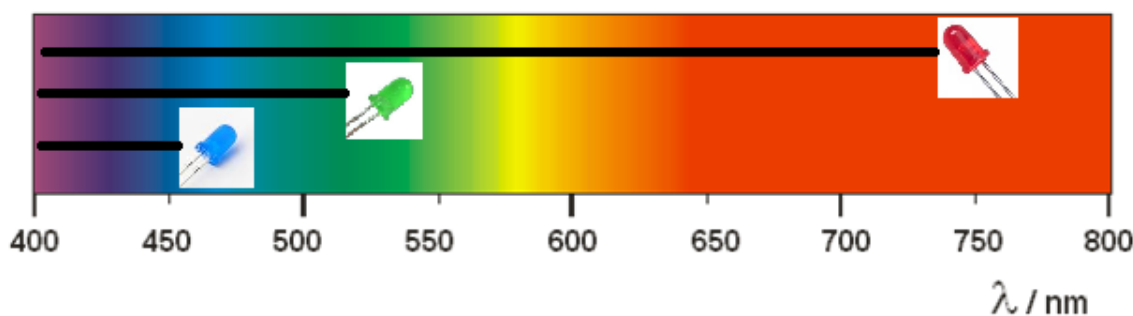
Dalším důležitým parametrem při výběru vhodného senzoru pro snímání laserových výstřelů je typ uzávěrky („rolling shutter“ nebo „global shutter“) a rychlost snímání. Délku doby laserového impulsu je vhodné udržet na co nejnižší hodnotě (nejlépe do 5 ms) pro větší bezpečnost laserového zařízení, a proto je nutné použít i rychlý snímací systém, který nejlépe snímá ve všech bodech snímací plochy současně.

Obrazové snímače se využívají v precizních závodních terčích nejvyšších kategorií. Většinou je použita již kompletní průmyslová kamera, která má objektiv namířen na stínítko mezi kamerou a terčem. Podle vzdálenosti od stínítka a optických vlastností objektivu je pak určena snímaná plocha. Kamery mají často funkce jako přizpůsobení na okolní jas a tak je třeba pouze zajistit dostatečnou citlivost na použité laserové zařízení.

Použitelnost v tomto projektu opět blokuje vysoká cena. Nejlevnější vhodné kamerové moduly stojí okolo 500 Kč. Další nevýhodou je rychlý vývoj nových snímačů, takže za pár let by mohl být problém sehnat zastaralé kamerové moduly pro další výrobu a tím by vznikla nutnost nového návrhu. Ovšem jedná se o příležitost sestavit preciznější zařízení pro náročnější střelce po dokončení produktu této práce. Lze také využít potenciálu kamery chytrého telefonu, který v dnešní době vlastní velká část populace, tak jako toho využil startup iTarget (viz kapitola 1.1), čímž by odpadly pořizovací náklady na snímací pole úplně.

1.3.5 Pole LED

Každá světlo emitující dioda (LED) může být použita jako snímač světla. Není k tomu přímo určena, a tak jsou snímací parametry slabší oproti fotodiodám. Stále však lze při vhodném řízení získat z LED plnohodnotný fotosenzor. V porovnání s výše uvedenými je LED senzor nejlevnější a poskytuje možnost snímat i svítit z jedné součástky. Další výhodou, obzvláště pro tento projekt, jsou spektrální vlastnosti LED při snímání. LED je totiž citlivá pouze na světelné záření o stejné nebo nižší vlnové délce, než je vlnová délka, kterou sama při svícení vyzařuje. Černé čáry na diagramu z obrázku 17 naznačují spektrální oblasti, ve které je LED schopna snímat. Pro zelenou LED tedy platí, že může dobře snímat modré a zelené záření, červené však již ne. To je skvělá vlastnost pro laserovou střelbu, protože například při použití modrých snímacích LED není nutné navrhovat filtraci okolního světla ve zbytku viditelného spektra. Sluneční záření, které je nejsilnějším zdrojem rušení, má největší intenzitu v zeleném spektru a pomocí modrých LED lze tak tuto nejproblémovější část záření eliminovat.



Obrázek 17: Diagram citlivosti LED na různé vlnové délky viditelného spektra (převzato z [16]).

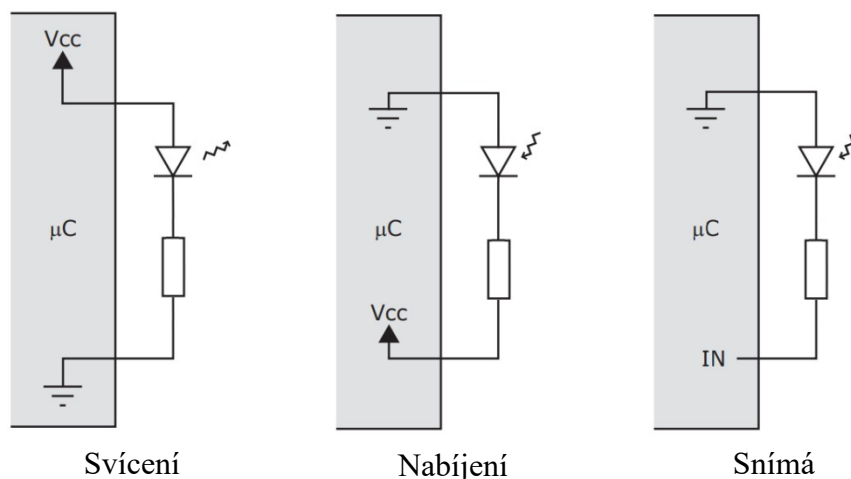
Existují dva základní způsoby, jak používat LED jako snímač. Prvním z nich je anodové snímání. Katoda LED je zapojena na zem a na anodě se měří hodnota napětí vůči zemi například pomocí analogového vstupu na mikrokontroléru. Princip funguje tak, že pokud dopadne proud fotonů na vyprázdněnou oblast PN přechodu, vygenerují se páry volných nosičů náboje, elektrony a díry. Elektrony jsou přitahovány do n typu

polovodiče a díry do polovodiče typu p. Tím se vytvoří na přechodu elektrické pole, které způsobí změnu napětí na anodě, které je úměrné intenzitě dopadajícího světla. Při odstranění zdroje světla nosiče velmi rychle rekombinují a PN přechod se dostane zpět do rovnovážného stavu.

Výhodou tohoto způsobu snímání je rychlost, která je omezena pouze schopnostmi měřícího zařízení. Při použití již zmíněného způsobu měření pomocí analogových vstupů na mikrokontroléru je možno měřit s rychlostmi v řádu stovek kHz, což je více než dostačující. Dále je zde možnost zapojit více LED na stejné vstupy řídicího systému. Jeden analogový vstup pak může obsluhovat několik LED a rychlost snímání bude stále velmi vysoká. Způsob je tedy vhodný pro získání okamžitých hodnot o intenzitě osvětlení všech diod. Nevýhodou je, že k obsluze je třeba relativně hodně přídavného hardware (dostatek analogových vstupů, tranzistory na uspokojení proudových požadavků LED, posuvné registry a další). Jakékoliv další součástky jsou nežádoucí, protože každá z nich zvyšuje výrobní náklady na výsledné zařízení.

Druhý způsobem snímání pomocí LED je katodové snímání. Tentokrát je uzemněna anoda a na katodu je přivedeno kladné napětí. Depleční vrstva PN přechodu funguje jako izolační a dioda se začíná chovat jako kondenzátor s velmi malou kapacitou. Katoda se odpojí od kladného zdroje napětí a připojí se na vstup, který měří čas, za jak dlouho se LED „vybijí“ na určenou hodnotu. V praxi se jedná například o digitální vstup mikrokontroléru, který má danou hodnotu napětí pro přečtení logické hodnoty 0 na vstupu. Nabitá LED se vybíjí s rychlostí úměrnou intenzitě dopadajícího záření. Fotony, které dopadnou na PN přechod opět vygenerují volné nosiče náboje a ty neutralizují náboj mezi elektrodami.

Doba vybití LED je závislá na dopadajícím záření. Pohybuje se od desetin mikrosekund při silném záření až po několik sekund ve tmě. To je také hlavní nevýhoda tohoto způsobu měření. Pokud bychom chtěli přesnou informaci o aktuálním jasu v okolí LED, mohlo by měření trvat i několik sekund. Pro tuto práci ale není důležité získat přesné měření, ale pouze informaci o tom, že LED byla vybita dostatečně rychle, což znamená, že byla zasažena laserem. LED tak vlastně podává dvoustavovou informaci. Díky tomu není nutné používat analogové měření, ale stačí pouze vyčítat logickou hodnotu LED klasickými digitálními vstupy.



Obrázek 18: Zapojení LED pro katodové snímání (převzato z [18]).

Nevýhodou je nemožnost multiplexování celého procesu, respektive zhoršení snímacích parametrů při takovém zapojení, protože napojení několika katod LED na sebe způsobí znásobení kapacity, kterou je nutné vybit a jedna trefená LED pak musí vybit sebe i všechny paralelně připojené LED. Naopak okolní světlo vybíjí všechny LED. Vybíjení okolním světlem tedy trvá stejnou dobu jako v zapojení jedné LED a vybíjení laserem trvá násobně déle. Tím se zhoršuje poměr těchto dvou časů, což je natolik nežádoucí, že s maticovým zapojením vývoj nepokračoval. LED jsou použity i proto, že s nimi jde při střelbě svítit, takže mohou zobrazovat vizuální zpětnou vazbu pro střelce. Lze tak například svítit s krajním prstencem terče přímo při snímání pro větší atraktivitu zařízení, což znamená střídání mezi snímáním a svícením LED s takovou frekvencí, že lidské oko vidí pouze konstantně svítící prstenec. Zde je opět nevýhodou délka snímání, která tak ubírá dobu pro svícení a tedy snižuje jas případných zobrazovaných prstenců.

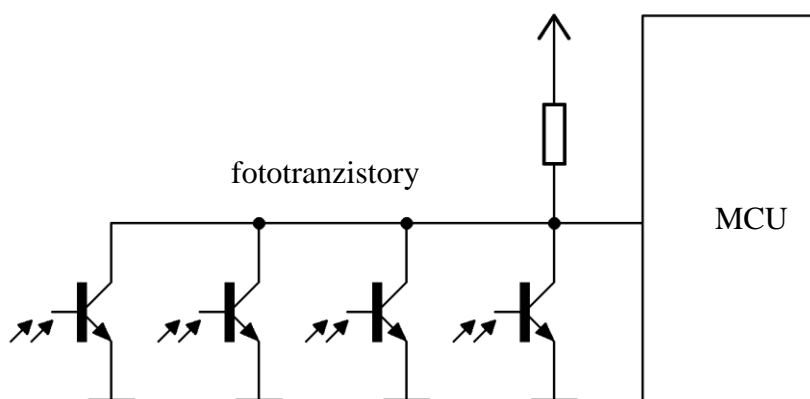
Lepších výsledků z hlediska odolnosti bylo dosaženo s katodovým snímáním. Proces se pro modré LED s vysokou svítivostí podařilo optimalizovat na velmi dobrou odolnost proti okolnímu osvětlení. Kvůli nízké ceně snímacího pole tvořeného pouze LED, jejich schopnosti snímat světlo a svítit bylo pole LED, v kombinaci s katodovým snímáním, přes všechny nevýhody vybráno jako nejvhodnější pro splnění zadání diplomové práce.

1.4 Historie projektu

Tento projekt už je ve vývoji několik let, a tak je možné vycházet nejen z cizích zařízení, ale také z vlastních prototypů. První prototyp terče vznikl v roce 2014.

1.4.1 Prototyp terče 1

Jako snímací plocha je zde použito pole fototranzistorů KP101. Terč 1 a celý jeho obvod je velice primitivní. Pole 300 fototranzistorů je rozděleno do deseti skupin – deseti soustředných prstenců. Všechny skupiny jsou zapojeny jako dělič napětí tvořený pevným odporem a jedním nebo více paralelními fototranzistory. Každý prstenec představuje bodovou hodnotu zásahu od 1 do 10 podle vzdálenosti trefy od středu. Podle toho, jestli je některý fototranzistor osvětlen, a tedy mu výrazně poklesne odpor mezi kolektorem a emitorem, je na výstupu děliče logická úroveň 1 nebo 0. Každý z děličů je připojen na jeden pin mikrokontroléru Atmega8, který při snímání pouze vyhodnocuje logickou úroveň a podle toho zobrazuje body na sedmissegmentovém displeji. Obrázek 19 ukazuje schéma zapojení 4 paralelních fototranzistorů stejným způsobem jako v prototypu terče 1.



Obrázek 19: Schéma snímacího mechanismu Terče 1 (převzato z [19]).

Terč má značné nevýhody. Tou hlavní je, že vnější prstenec snímacího pole je složen ze 44 fototranzistorů, které jsou všechny zapojeny paralelně. Pro jeden fototranzistor platí, že ve tmě je jeho odpor mezi kolektorem a emitorem neměřitelný klasickými přístroji. To znamená, že přesahuje hodnotu stovek megaohmů. V osvětleném stavu má fototranzistor podle intenzity světelného záření odpor v řádu stovek kiloohmů při osvětlení běžným pokojovým světlem za dne až několik stovek ohmů při silném osvětlení laserovým ukazovátkem s udávaným světelným výkonem 5 mW.

Pro jeden fototranzistor je tedy velká úroveň volnosti návrhu porovnávacího rezistoru. Logická úroveň 0 se zaregistruje přibližně v momentu, kdy napětí na výstupu děliče poklesne na třetinu napájecího napájení (které je zde 4,5 V). Tedy aktuální odpor na fototranzistoru musí být poloviční oproti statickému porovnávacímu rezistoru. Operační meze pro fototranzistor byly stanoveny na 500 Ω při zásahu a 15 k Ω pro stav bez zásahu. Pro prostřední prstenec pole, kde je zapojen pouze jeden fototranzistor, byla zvolena hodnota porovnávacího rezistoru 10 k Ω .

Pro paralelní zapojení ale klesá odpor spojených fototranzistorů. Konstantně osvětlený fototranzistor lze nahradit modelem, který je tvořen pouze rezistorem. Pro paralelní kombinaci rezistorů platí vztah:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3)$$

kde R je celkový odpor a $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ jsou paralelně zapojené rezistory. Pro kombinaci paralelně zapojených rezistorů se stejnou velikostí platí, že celkový odpor je roven podílu odporu jednoho z rezistorů a počtu rezistorů. Tedy v případě zapojení 44 paralelních fototranzistorů klesne odpor kombinace na hodnotu 44 krát menší než je hodnota odporu jednoho fototranzistoru. To je problém v případě, že na všechny fototranzistory dopadá okolní světlo a odpor každého z nich je tedy shodně snížen na hodnotu například 10 k Ω . Celkový odpor kombinace je pak podle výpočtu 227 Ω a v tu chvíli tedy nelze rozlišit mezi zářením z laseru a okolním světlem. Terč tedy v takovém zapojení správně funguje pouze při velmi slabém okolním osvětlení.

Snesitelnější citlivost by terč měl v případě, že by na jeden pin mikrokontroléru bylo zapojeno maximálně 5 fototranzistorů, a to by zabralo přes 60 snímacích pinů. V tu chvíli se jedná o naprosto neefektivní řešení. Při odpojení vnějších prstenců funguje terč dostatečně spolehlivě a z tohoto prototypu je tedy užitečná pouze informace, že fototranzistor v použitém zapojení funguje velmi spolehlivě, pokud je připojen sám, paralelní kombinace je pro tento projekt relativně nepoužitelná. Stále se ale jedná o velmi jednoduché a levné řešení, a proto může být zapojení jednoho fototranzistoru využito i ve výsledném produktu.

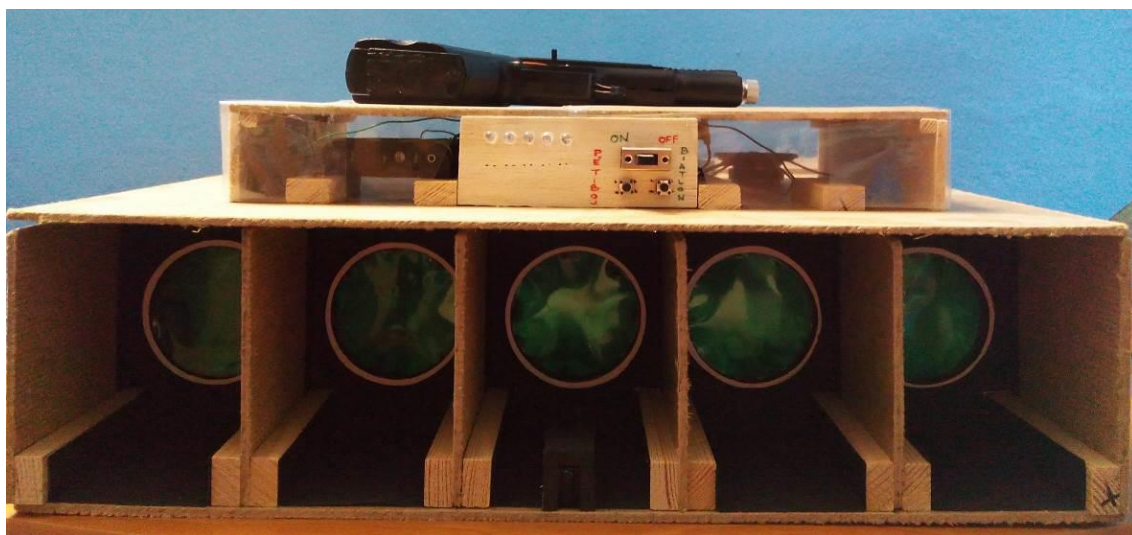
1.4.2 Prototyp terče 2 – Veronika

Ve druhém prototypu, nazvaném Veronika, jsou jako senzory opět použity fototranzistory, ale tentokrát ne jako pole, ale jako samostatný senzor. Velikost terče je pak dána tvarem spojné čočky, která zaostřuje světelné paprsky do ohniska v opačné optické polovině. Do ohniska je umístěn právě fototranzistor, a proto všechny paprsky, které dopadají kolmo na čočku, dopadnou na fototranzistor. Nejlevnější komerčně dostupné čočky jsou prodávány ve formě lup. Ty ovšem mají relativně velkou

ohniskovou vzdálenost (vzdálenost ohniska od čočky). V tomto projektu byly použity čočky s průměrem 6 cm a ohniskovou vzdáleností 30 cm, což je tedy nejmenší možná hloubka celého zařízení, a to je značně nevýhodné s ohledem na návrh zapouzdření.

Dalším problémem je, že kromě světla z laseru se do ohniska čočky fokusuje i okolní světlo přicházející ze směru střelce. To opět posouvá hranici, kdy je fototranzistor schopen rozlišit mezi zásahem z laseru a okolním světlem. Kvůli tomu bylo v terči úspěšně použito několik způsobů filtrace okolního světla. Snímací fototranzistor je zapouzdřen v komoře, která propouští světlo pouze čočkou, kterou přicházejí výstřely. Na čočku je navíc aplikován spektrální filtr. Pro výbornou viditelnost byl zvolen do zbraně pro tento terč zelený laser, který je při stejném světelném výkonu jako lasery ostatních barev pro lidské oko nejlépe viditelný. Filtr na čočce tedy propouští nejvíce zelenou barvu a ostatní potlačuje. V této konfiguraci je terč schopen spolehlivě fungovat do hodnoty okolního osvětlení 8 klx, což už je pro vnitřní použití dostatečná hodnota.

Terč byl postaven v konfiguraci pro biatlon, a tedy obsahuje 5 shodných snímacích komor. V terči je také použit obvod pro kontrolu výstřelu ze zbraně založen na infračervené diodě a přijímači TSOP 1736. Díky tomu terč umí vyhodnocovat i výstřely, které nezasáhly žádný ze senzorů. To je obzvlášť pro biatlonové režimy nezbytná věc. Tento prototyp již obsahuje 2 střelecké režimy a to biatlon (5 střel v každém kole) a moderní pětiboj (střelec střílí, dokud nezasáhne všech 5 terčů).



Obrázek 20: Fotografie prototypu laserového terče Veronika

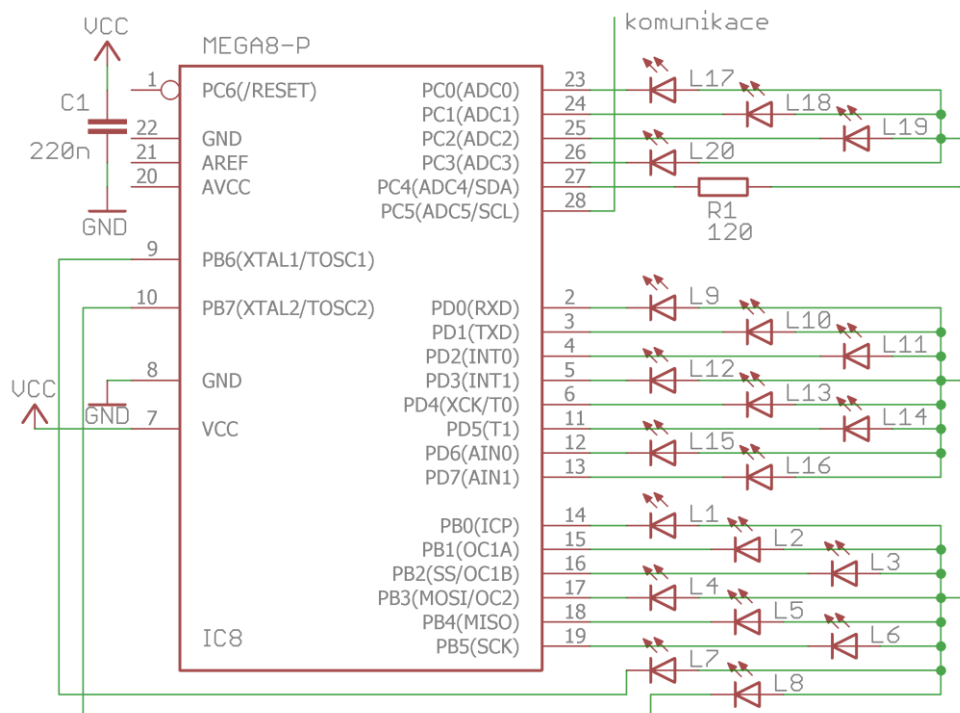
1.4.3 Prototyp terče 3 – Gabriela

Ve třetím prototypu je poprvé využit princip katodového snímání s LED. Snímací pole je tvořeno 253 modrými LED. Byly použity LED emitující světlo v modrých vlnových

délkách s kulatou hlavou a THT provedením. Modrá barva byla vybrána kvůli spektrálním vlastnostem LED popsaných v kapitole 1.3.5. Montáž THT je sice nevýhodná pro sériovou výrobu, ale pojí se s ní jiná důležitá vlastnost, a to úhel vyzařování. To je veličina, která udává, v jakém úhlu hlavního směru svícení bude stále garantovaná intenzita emitovaného světla. V praxi to znamená, pod jakým úhlem lze pozorovat nejsilnější záření z dané LED. Úhel vyzařování však také platí pro snímání. Pokud tedy bude dopadat světlo na LED pod větším úhlem, než je její vyzařovací úhel, bude výsledkem snímání nižší hodnota než při záření pod nulovým úhlem.

Úhel vyzařování je údaj udávaný v datovém listu ke každé LED a je určen zejména konstrukcí jejího pouzdra. Nejběžnější (a tedy často nejlevnější) typy pouzder LED jsou 5 mm pouzdro s kulatou hlavou (THT), PLCC 5050 (SMD) a 1206 (SMD). Pro pouzdro s kulatou hlavou je typický úhel vyzařování 20°, pro PLCC 5050 a pro pouzdro 1206 je typický úhel vyzařování 120°. Laserové paprsky budou při standardním používání dopadat na terč pod úhlem menším než 20°. Proto je výhodnější použít pouzdro s menším úhlem vyzařování, neboť bude odolnější proti okolnímu nežádoucímu záření dopadajícím pod větším úhlem. Nejvhodnější by bylo SMD pouzdro pro pohodlnou a levnou strojovou montáž s vyřazovacím úhlem mezi 10° a 30° a takové LED existují, jenomže jsou tak „nestandardní“, že je jejich cena řádově 10 krát větší než zmíněné varianty, což je nepřijatelné.

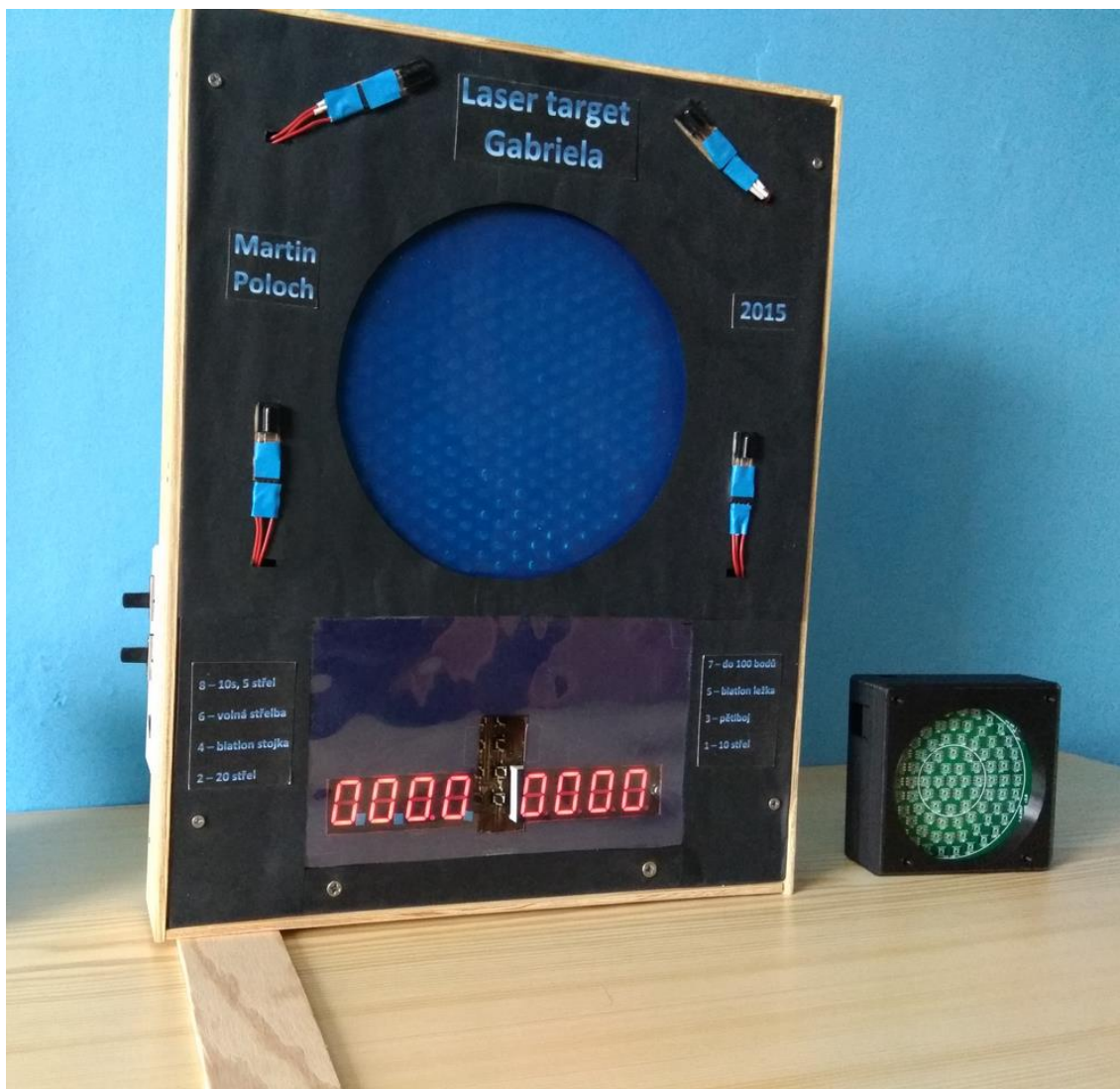
K řízení pole led byl vybrán mikrokontrolér Atmega8. Hlavním kritériem pro výběr byla cena vztahena na jeden vstupně výstupní pin. Pokud má být každá LED řízena z jednoho vstupně výstupního pinu (což je nutné, viz kapitola 1.3.5), nelze celé pole řídit z jednoho samostatného mikrokontroléru. Počet vstupně výstupních pinů lze zvýšit posuvnými registry, ale cena nejlevnějších registrů se v době návrhu pohybovala okolo 20 Kč a takový registr měl pouze 8 vstupně výstupních pinů. Oproti tomu Atmega8, která byla v prodeji za srovnatelnou cenu má použitelných pinů 22, a tedy byl zvolen pro řízení snímacího pole systém třinácti komunikujících mikrokontrolérů Atmega8. Z 22 pinů byly 2 použity pro komunikaci a společnou anodu pro LED. Na zbylých 20 pinech jsou připojeny snímací LED (viz obrázek 21).



Obrázek 21: Zjednodušené schéma zapojení LED na snímací mikrokontrolér Atmega8 (přejato z [19]).

Další 3 mikrokontroléry zajišťují sběr dat ze snímacích mikrokontrolérů a řídí periferie pro ovládání terče a vizualizaci výsledků na terči. Výsledky jsou střelcům zobrazovány ve formě rozsvícení trefené led na 500 ms po zásahu a na dvou displejích, které ukazují aktuálně dosažené body a čas od začátku střelby. 8 tlačítek slouží k výběru jednoho z osmi střeleckých režimů. Terč umí simulovat například režim rychlostřelba (za 10 sekund musí střelec vystřelit 5 střel), biatlon s velkým i malým terčem (simulace střelby v leže i ve stoje) nebo režim pro atraktivní soupeření více hráčů do 100 bodů se střídáním po 3 střelách.

Pro získávání informace o výstřelu, který netrefí snímací pole, obsahuje terč Gabriela, stejně jako předchozí prototyp, IR přijímače. Pro zvětšení šance na úspěšné přijetí informace ze zbraně i ve špatných podmínkách a na velkou vzdálenost byl terč navrhnut se čtyřmi IR přijímači s různým natočením. Průměr snímací plochy terče je 18 cm. Celý terč je zobrazen na obrázku 22.



Obrázek 22: Třetí prototyp Gabriela, porovnání s velikostí finálního zařízení.

Displeje zabudované přímo do terče Gabriela jsou příliš malé pro dobrou čitelnost na vzdálenost více než 5 m. Proto vznikl modul velkého displeje, který má za úkol zobrazovat data aktuální střelby. Velký displej je naprogramován tak, aby spojil funkce obou malých displejů, a zobrazuje tedy střídavě počet bodů, časomíru a další údaje.

S modulem velkého displeje je v terči použito 17 mikrokontrolérů, které spolu musí komunikovat. Vzhledem k tomu, že bylo vyhrazeno co nejvyšší množství vstupně výstupních pinů mikrokontrolérů na připojení snímacích LED, je ke komunikaci všech mikrokontrolérů použit speciální protokol komunikace přes jeden vodič. Komunikace funguje na principu posílání informace ve formě pulsů určité délky. Díky tomu je výhodné posílat pouze velice jednoduché informace. Jeden mikrokontrolér je vysílač (master) a druhý přijímač (slave). Obě strany musí být na takovou komunikaci připraveny chodem svého programu. Protokol má celou řadu nedostatků. Tím hlavním je, že neřeší nestandardní či chybové chování a při selhání komunikace je nutno

resetovat celý terč. Je to způsobeno i faktem, že veškerý firmware pro všechny mikrokontroléry je programován v jazyce assembler.

Přesto se jedná o řešení, které bylo díky své hlavní výhodě (zabírá pouze 1 vstupně výstupní pin mikrokontroléru) zvoleno pro komunikaci mezi některými prvky finálního návrhu. Kromě komunikačního protokolu má ve finálním návrhu svou hodnotu také modul velkého displeje a také byl na terči Gabriel dostatečně ověřen princip katodového snímání.

1.4.4 Prototyp terče 4 – Rachel

Návrh prototypu Rachel byl předmětem autorovy bakalářské práce [19]. Je zaměřen na co nejvěrnější simulaci střelby v biatlonu. Celá terčovnice tak obsahuje 5 terčů s přesnými biatlonovými rozměry a lze na něm simulovat zejména veškeré závodní biatlonové režimy. Firmware terčů Rachel byl vytvořen v jazyce C, což umožnilo vytvořit sofistikovanější řídicí systém.

Jeden terč Rachel obsahuje „pouze“ 91 snímacích LED, ze kterých je vytvořeno 6 soustředných prstenců. K ovládání snímacích LED byly opět použity mikrokontroléry Atmega8, kterých je pro 91 LED potřeba 5. Mikrokontrolér, který řídí celý systém, potřebuje více paměti FLASH než je kapacita v Atmega8, a proto byla použita Atmega16. Řídicí mikrokontrolér sbírá informace ze všech terčů, ovšem není již napojen na všechny mikrokontroléry všech terčů, ale komunikuje pouze s hlavním mikrokontrolérem každého terče.

Komunikace mezi zbraní a terčovnicí probíhá bezdrátově pomocí modulů nRF24 a převodníků SPI na UART. Komunikační protokol je opět velmi jednoduchý. Jedná se pouze o posílání údaje o střele ze zbraně do řídicího mikrokontroléru. Mezi jednotlivými mikrokontroléry v terči opět funguje komunikace přes jeden vodič a speciální komunikační protokol uzpůsobený pro efektivní a spolehlivé posílání informací.



Obrázek 23: Terčovnice s jedním aktivním prototypem terče Rachel

Konstrukce terčovnice z bakalářské práce je v předním pohledu vidět na obrázku 23. Terčovnice měří na délku 1,1 m a váží 17 kg. Zařízení obsahuje velký displej, který má dobrou čitelnost i na vzdálenosti přes 20 metrů a zvukový modul s reproduktorem, díky kterému může terčovnice bez dalších zařízení podávat okamžitou zvukovou zpětnou vazbu střelci. Uživatel může zařízení ovládat pomocí 8 tlačítek a 5 přepínačů na kontrolním panelu nebo z počítačové aplikace. Ta umí zařízení nejen ovládat, ale také zobrazovat údaje o střelbě v pokročilejší formě než hardwarové terče a displeje.

Celá terčovnice má vysoký odběr, takže je nutné ji napájet pomocí síťového adaptéru. Zároveň velikost a vysoká hmotnost terče způsobují velmi špatnou přenositelnost zařízení. Zařízení má výrobní náklady vysoko nad optimálními a na trh by se tak prosadilo obtížně. Oba komunikační protokoly (bezdrátový a komunikace po jednom vodiči) nejsou připravené pro běžný provoz a často je dosavadní terče nutné resetovat do úvodního stavu. Vytvořená aplikace je kompatibilní pouze s počítači s operačním systémem Windows. To vše jsou velké nedostatky, kvůli kterým vznikl návrh finálního prototypu, který je předmětem této práce.

1.4.5 Prototypy zbraní

K prvním dvěma prototypům byly použity zbraně se zeleným laserem o výkonu 5 mW. Třetí a čtvrtý prototyp používají princip katodového snímání. Katodové snímání vykazuje nejlepší výsledky s lasery s vlnovou délkou stejnou, jako je vlnová délka charakteristického záření snímacích LED. Byly tedy použity modré lasery o výkonu 5 mW.

Všechny zbraně obsahují elektromechanické tlačítko napojené na spoušť zbraně, které pošle informaci o zmáčknutí spouště do zbraňového mikrokontroléru. Ten na krátký okamžik (5 – 50 ms) zapne připojený laser a v případě zbraní k prototypům s bezdrátovou komunikací ještě posílá informaci o výstřelu.

Obrovský nedostatek všech dosud vyrobených prototypů zbraní je nepřipravenost pro automatizovanou výrobu. Všechny funkční prototypy zbraní byly vytvořeny tak, že za spouští bylo namontováno mechanické tlačítko a laser i celý zbytek obvodu byl umístěn dovnitř těla zbraně. Vždy se jednalo o hotové zbraně připravené pro airsoftovou střelbu („kuličkovky“). Takový způsob vyžaduje mechanický zásah do zbraně, její demontáž a opětovnou kompletaci, což je náročné jak na čas, tak na dovednosti, a tedy velmi nevhodné pro výrobu více kusů. Na obrázku 24 je ukázka zbraně upravené pro laserovou střelbu touto neefektivní metodou. V zadní části zbraně je umístěn řídicí obvod a zesilovač pro reproduktor (tato konkrétní zbraň vydává i zvukové signály), za spouští je vidět tlačítko. V zásobníku zbraně jsou umístěny akumulátory a v přední části je laser a IR LED.

Podobné sestavování zbraně je v sériové výrobě nepřijatelné a proto je nutné vytvořit kompletně nový návrh zbraní pro finální zařízení. Jednou z možností je vyrábět speciální obvod, který bude navrhnout přímo pro korpus speciální vyráběné zbraně. Druhou možností je vytvořit samostatný modul, který se ke zbraní jednoduše připojí tak, jak to bylo popsáno v kapitole 1.1.

Všechny doposud vyrobené terče i zbraně jsou podrobněji popsány v autorově bakalářské práci [19].



Obrázek 24: Úprava zbraně pro prototyp terče 3 Gabriela

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se zabývá kompletním návrhem a realizací zařízení pro sportovní střelbu tak, jak to bylo specifikováno v zadání práce. Návrh je rozdělen do 3 samostatných modulů, a to modul terče, modul do zbraně a kontrolní modul. Všechny 3 moduly by měly mít minimální rozměry vzhledem ke své funkci a nízkou hmotnost pro lehkou přenositelnost. Komunikace mezi moduly může probíhat přes vhodné kabely nebo bezdrátově. Kvůli snížení spotřeby a jednoduchého sjednocení komunikačních protokolů drátové komunikace bylo pro všechny moduly zvoleno hlavní napájecí napětí 3,3V. Všechny moduly jsou řízeny mikrokontrolérem s firmware napsaným v jazyce C.

2.1 Volba vhodné měřicí LED

Z poznatků popsaných v teoretické části vyplynulo, že nejvhodnějším způsobem realizace snímací plochy pro modul terče bude katodové snímání na LED (snímací princip je podrobně popsán v kapitole 1.3.5). K určení nejvhodnější LED pro tento projekt bylo vyrobeno speciální měřicí zařízení využívající přímo princip katodového snímání. Zařízení obsahuje mikrokontrolér, na jehož digitální piny se připojí měřená LED (přes rezistor s odporem 120 Ω). Ta je pak mikrokontrolérem nabita závěrným napólováním (systém umožňuje různé délky nabíjení). Poté jsou piny nastaveny do měřicího režimu a MCU měří, za jak dlouho se LED vybije natolik, že mikrokontrolér přečte na snímacím pinu připojeném na katodu LED logickou úroveň 0. Výsledný čas pak mikrokontrolér posílá přes UART do počítače.

S každou LED je provedeno několik měření v různých podmínkách. Měří se doba nutná k vybití led při osvětlení laserem přímo do středu LED, při osvětlení laserem, kdy se viditelné paprsky pouze dotýkají malou částí aktivní plochy LED, při osvětlení referenčním zdrojem světla a ve tmě. Pro měření byly použity lasery o 3 vlnových délkách, a to 650 nm, 532 nm a 405 nm, což jsou 3 nejpoužívanější vlnové délky v běžných laserových ukazovátkách (do 5 mW světelného výkonu), a je tedy předpoklad, že bude výroba takových laserových diod optimalizovaná a jejich cena nízká. Jako referenční zdroje světla byly použity 2 lampy s velmi podobným rozložením intenzity světla ve spektru jako sluneční záření. Lampy byly nastaveny tak, že intenzita osvětlení změřená luxmetrem v místě měřené LED byla u první lampy 4000 lx a u druhé 300 lx. Za tmu je v tomto měření považováno osvětlení s intenzitou menší než 10 lx.

Tabulka v příloze A.1 obsahuje kompletní výsledky měření s 24 různými LED, které byly vybrány podle několika kritérií. Prvním z nich byla cena. Vzhledem k požadavkům na nízké výrobní náklady snímacího pole bylo měřeno pouze s diodami,

které šlo koupit za méně než 1 Kč za 1 kus při nákupu 1000 kusů. Dále byly záměrně vybírány LED s velmi podobnými parametry až na jeden, čímž mělo být jednodušší sledovat změny výsledných časů v závislosti na jednom konkrétním parametru. Měření je kvůli použití amatérských přístrojů zatíženo většími chybami (rozptyl některých hodnot se při měření pohyboval okolo 30 % z naměřené hodnoty), ale i tak lze z měření vysledovat důležité závislosti jednotlivých parametrů.

Měření ověřilo teoretický poznatek, že pro tento projekt jsou nejvhodnější modré LED. Nejvhodnějším ukazatelem tohoto faktu je poměr délky vybití LED při osvětlení intenzitou 4000 lx a vybití LED při částečném zásahu laserem. Čím je tento poměr větší, tím lze lépe rozlišit mezi okolním osvětlením a zásahem, což je pro výsledné zařízení stěžejní faktor. Jinými slovy poměr vyjadřuje, kolikrát je možno zvýšit intenzitu okolního světla, aby ještě bylo možno rozlišit okolní světlo od laserového výstřelu. Červené i zelené LED v tomto ohledu vysoce zaostávají za modrými při použití srovnatelných ostatních parametrů.

Dále bylo měřením ověřeno, že při katodovém snímání musí mít zdroj světla menší nebo stejnou vlnovou délku, než je vlnová délka vybíjené LED. Lze si toho všimnout u červených LED, které mají charakteristickou vlnovou délku 620 až 630 nm a jsou velmi špatně vybíjené laserovým zářením o vlnové délce 650 nm. Naopak modrý i zelený laser na nižších vlnových délkách vybíjejí tyto LED lépe. Použití červených LED by se zřejmě také dalo optimalizovat pro použití s červeným laserem, ale vzhledem k tomu, že nejběžnější vlnové délky červeně svítících LED jsou nižší než nejběžnější vlnové délky červených laserů, bylo by „červené“ řešení nákladnější.

Odolnost snímacího procesu vůči okolnímu osvětlení klesá s rostoucím vyzařovacím (a tedy i snímacím) úhlem LED. Tento fakt je nepříjemný, protože v dané cenové hladině není ani jedna LED v SMD pouzdře s vyzařovacím úhlem menším než 120 °. Optimalizací ostatních parametrů lze ale i s takovým úhlem dosáhnout dostatečně dobrých výsledků. Lze také vysledovat, že při osvětlení pouze kraje LED laserem se LED vybíjí přibližně 200 až 300 krát pomaleji, než při zásahu do středu LED. Aby mezi LED nevznikala na terči slepá místa, musí se při návrhu počítat s touto násobnou hodnotou.

Velmi důležitým poznatkem je fakt, že s rostoucí svítivostí LED roste i rychlost vybíjení. Svítivost je navíc vhodná pro dobrou viditelnost LED při silnější intenzitě okolního světla pro zobrazování údajů na terči střelců. Z měření a zkušeností byla stanovena minimální hodnota svítivosti použité LED na 5000 mcd.

Jako nejvhodnější byla vybrána LED číslo 18 z tabulky v příloze A.1. Pouzdro PLCC6 je vhodné kvůli velikosti aktivní plochy LED. Pouzdro je určeno pro povrchovou montáž. Díky své vysoké svítivosti má dostatečnou odolnost vůči okolnímu ozáření i přes vysoký snímací úhel. Navíc je plánováno posílit odolnost proti

okolnímu světlu vyšších intenzit pomocí filtrů a nelze předpokládat, že by filtr propustil 100 % žádoucího světla z laseru, takže se vybíjecí čas prodlouží, a proto je vhodné vybrat LED s co nejnižším vybíjecím časem, což LED č. 18 splňuje.

2.2 Návrh terče

Pro návrh terče platí následující základní požadavky. Zařízení se snímací plochou odpovídající velikosti a tvaru závodních terčů (kruh o průměru 6 cm až 11 cm). Snímání schopné zachytit všechny „výstřely“ a naopak být odolné proti co nejsilnějšímu okolnímu světlu. Lehce přenosné zařízení. Nízké výrobní náklady. Toto jsou stěžejní body, podle kterých bude návrh realizován.

2.2.1 Návrh snímacího pole a volba mikrokontroléru

Pro snímání byly zvoleny modré „supersvítivé“ LED v SMD PLCC6 pouzdře (často označovaném PLCC 5050 podle délky a šířky v desetínách milimetrů). Počet LED v kruhovém snímacím poli tvořeném stejně vzdálenými soustřednými prstenci se řídí empirickým vztahem

$$n_{LED} = 1 + 6 \left(\sum_{i=1}^{n_{PRST}-1} i \right), \quad (4)$$

kde n_{LED} je počet LED a n_{PRST} je počet prstenců terče. Uprostřed pole je 1 LED. Druhý prstenec tvoří 6 LED a každý další přidaný prstenec obsahuje o 6 LED více než předchozí prstenec. Délka i šířka jedné LED v pouzdře PLCC6 je 5 mm. Aby bylo možné k LED přivést cesty a nekolidovali jejich pájecí plošky, byla zvolena vzdálenost středů sousedních LED 8 mm. Větší vzdálenost by mohla na terči vytvořit slepá místa, kde by zásah laserem nezaregistrovala žádná snímací LED. Při vzdálenosti 8 mm pak platí vztah pro průměr snímací plochy

$$d = 8 + 16 (n_{PRST} - 1), \quad (5)$$

kde d je průměr snímacího pole v milimetrech a n_{PRST} je počet prstenců terče. V tabulce 2 jsou zobrazeny počty LED a průměr snímací plochy odpovídající vybraným počtům prstenců pro vytvoření snímacího pole terče.

Tabulka 2: Počet snímacích LED v závislosti na počtu prstenců v terči.

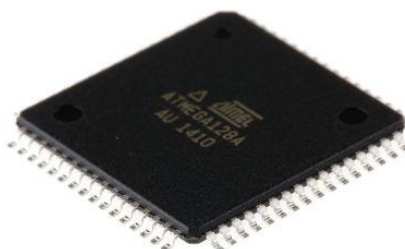
Počet prstenců	Počet LED	Průměr snímací plochy [mm]
3	19	40
4	37	56
5	61	72
6	91	88
7	127	104
8	169	120
9	217	136
10	271	152

Výběr MCU pro terč zohledňuje několik důležitých parametrů. Obecně je nutné vybrat mikrokontrolér s dostatečně velkou pamětí FLASH i RAM. V předchozích prototypech byl použit MCU Atmega8, který má 8 kB FLASH a 1 kB SRAM. U finálního prototypu je předpoklad, že bude využito více paměti zejména kvůli implementování bezdrátové komunikace. Mikrokontrolér musí fungovat s napájecím napětím 3,3 V. Pro snímací proces a ovládání bezdrátové komunikace je vhodná frekvence mikrokontroléru alespoň 1 MHz. Dále by měl mikrokontrolér obsahovat hardwarovou sběrnici SPI a pin pro ovládání externího přerušování pro komunikaci s bezdrátovým modulem (nRF24L01 viz dále). Všechny ostatní periferie jsou obstarávány pomocí GPIO (general purpose input/output – obecné digitální piny).

Vzhledem k tomu, že jedna snímací LED musí být zapojena na jeden GPIO a všechny výše uvedené parametry splňují stovky mikrokontrolérů, je stěžejním parametrem cena vztažená na 1 GPIO. Dalšími kritérii byly vhodné SMD pouzdro, dobré zkušenosti s rodinou mikrokontroléru, možnost programovat MCU v jazyce C, počet uživatelů a podpora MCU ve formě dostupných knihoven. Jako nejvhodnější mikrokontrolér pro takové zadání byl vybrán Atmega128A.

Mikrokontrolér Atmega128A má 128 kB FLASH paměti, 4 kB SRAM a 4 kB EEPROM, což bylo označeno za dostačující. Je schopen operovat na kmitočtu 16 MHz. Rozsah napájecího napětí je 2,7 V až 5,5 V. Dále obsahuje mimo jiné 5 různých čítačů, periferie SPI a USART, čehož bude v projektu také využito [20]. Nejdůležitějším parametrem je 53 programovatelných GPIO, což je při ceně 35 Kč za kus nejvýhodnější poměr mezi cenou a počtem digitálních pinů. Mikrokontrolér je na trhu již od roku 2008 a rodina mikrokontroléru Atmega je obecně ověřena dlouholetým používáním (lze ji považovat za nejznámější rodinu mikrokontrolérů posledního desetiletí). MCU lze programovat v jazyce C a přes internet lze zdarma získat několik set knihoven

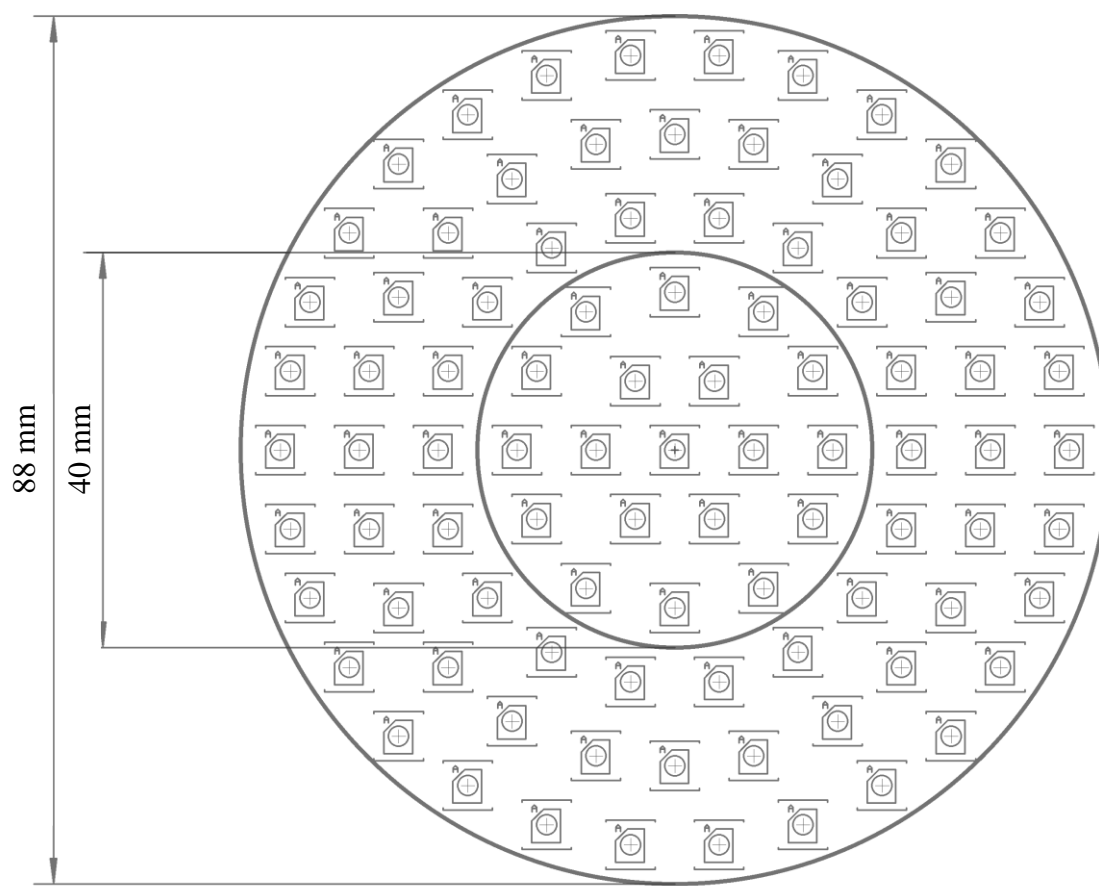
k ovládání všech běžných periferií a externích modulů jako například použitý modul nRF24L01+.



Obrázek 25: Atmega128A-AU v pouzdře TQFP64 (převzato z [21]).

Z požadavků na projekt lze předpokládat, že přibližně 7 pinů každého MCU bude použito jinak než na snímací LED (programovací piny, ovládání bezdrátového modulu, komunikace atd.). Pro jeden mikrokontrolér Atmega128A je tedy přibližně 46 GPIO volných pro připojení snímacích LED. Z tabulky 2 lze vyčíst počty snímacích LED pro daný počet snímacích prstenců. Průměr terče pro simulaci biatlonu je 11 cm. Proto by jej nejvěrněji nahradil elektronický terč se sedmi prstenci LED. Navíc prstenec číslo 3 má předpokládaný průměr 4 cm, což je přesně stejně jako biatlonový terč pro střelbu vleže a na jednom zařízení by bylo možné věrně simulovat oba terče. Pro takový terč je potřeba vytvořit pole se 127 LED. To by znamenalo použít minimálně 3 mikrokontroléry Atmega128A pro každý terč. Nabízí se ale také možnost terče s šesti prstenci, kde je počet potřebných LED 91, což je téměř přesně horní limit pro počet LED připojitelných ke dvěma MCU Atmega128A.

Z kalkulace výrobních nákladů na modul terče vyšlo najevo, že rozdíl ve výrobních nákladech mezi terči s šesti a se sedmi prstenci je přibližně 33 %. To je příliš velký nárůst nákladů kvůli minimálnímu zvětšení terče, proto byla vybrána verze s 6 snímacími prstenci. Výsledné rozložení LED s naznačením velkého a malého biatlonového terče je zobrazeno na obrázku 26. Na řízení tohoto pole je tedy potřeba 2 mikrokontroléry Atmega128A.



Obrázek 26: Rozložení LED na jednom terči.

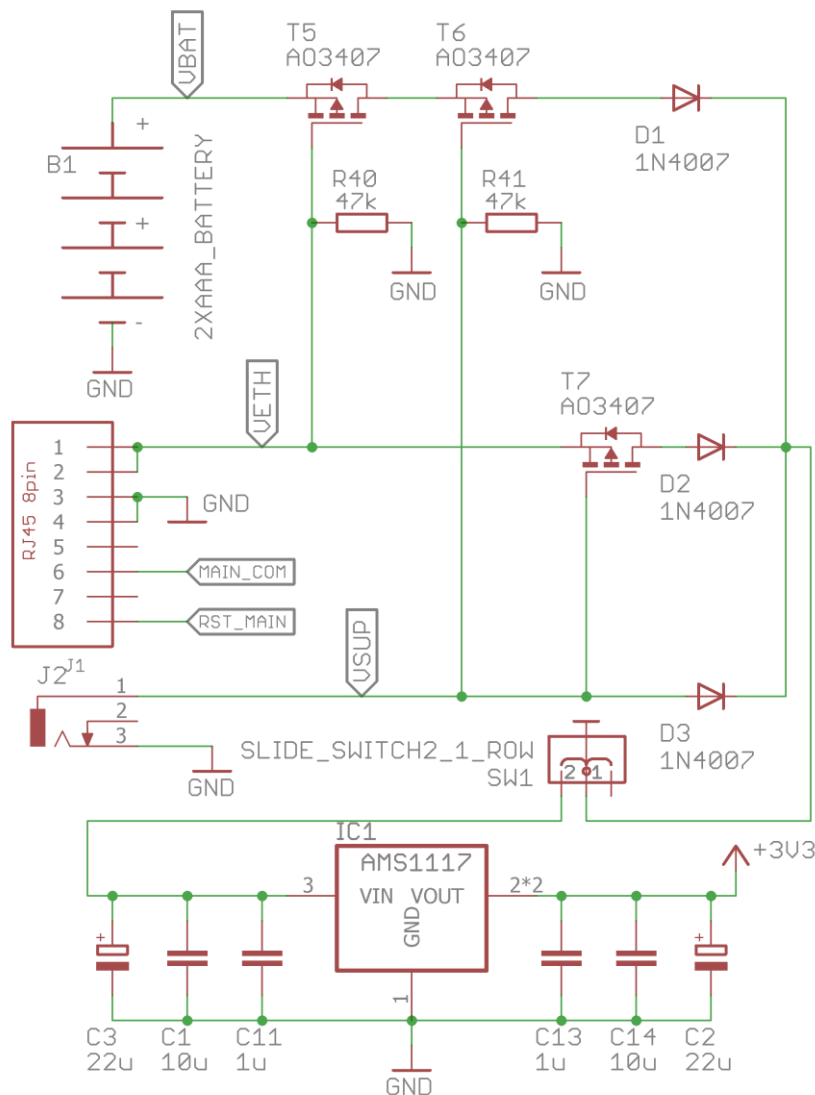
2.2.2 Napájecí obvody

Terč byl navržen tak, aby jej bylo možné napájet ze 4 tužkových akumulátorů typu AAA, přes ethernet konektor nebo z napájecího adaptéru s napětím 5 až 12 V. Všechny tyto různé hodnoty napájecího napětí jsou převedeny pomocí součástky AMS1117 na 3,3 V. AMS1117 je lineární regulátor s vysokou účinností a nízkým úbytkem napětí mezi vstupem a výstupem. Je schopen pracovat se vstupním napětím až 15 V při maximálním odběru 1 A.

Několik verzí terče bylo navrženo se zdrojem založeným na spínacím regulátor LM2596, ale ten se ukázal jako nevhodný, neboť příliš rušil bezdrátový modul sloužící pro komunikaci mezi jednotlivými moduly. AMS1117 přináší nevýhody jako ostatní lineární regulátory, a to nižší účinnost a značné zahřívání, ale i tak je pro projekt vhodnější. Regulátor je použit v SMD pouzdře SOT-223 a je k němu napojeno pouze 6 externích kondenzátorů.

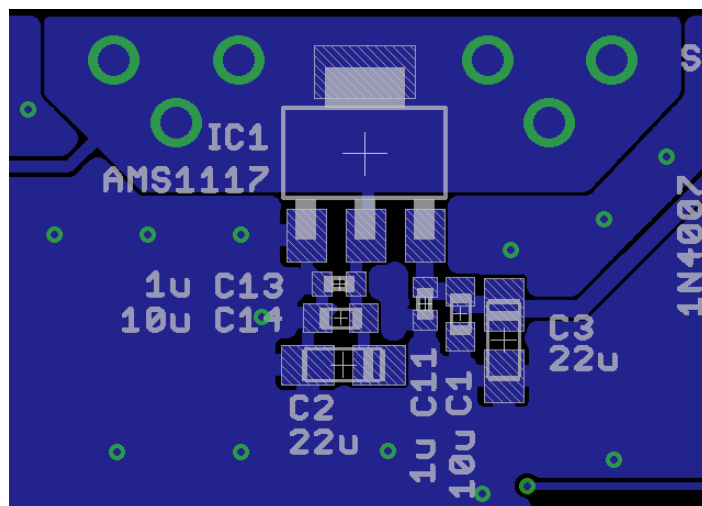
Napájecí obvod zaručuje (pomocí PMOS tranzistorů), že je vždy aktivní pouze jeden externí zdroj napětí (akumulátor, ethernet nebo adaptér). Pokud je zapojeno více

zdrojů, nejvyšší prioritu má napájecí adaptér, poté napájení přes ethernet. Akumulátor je používán pouze, pokud není aktivní jiný zdroj. Kompletní schéma napájecího obvodu je uvedeno na obrázku 27.



Obrázek 27: Schéma napájecího obvodu prototypu terče Lily

Lineární regulátory převádějí velkou část vstupního napětí na tepelnou energii, a proto je nutné zohlednit možnosti chlazení v návrhu. Bylo změřeno (viz dále), že terč má maximální proudový odběr přibližně 90 mA, a tedy tepelná energie bude natolik malá, že ji zvládne odvést měď na DPS. Pro jistotu byly ale navrhnuty v okolí zdroje prokovené otvory na případné připojení dalších chladičů (viz obrázek 28).



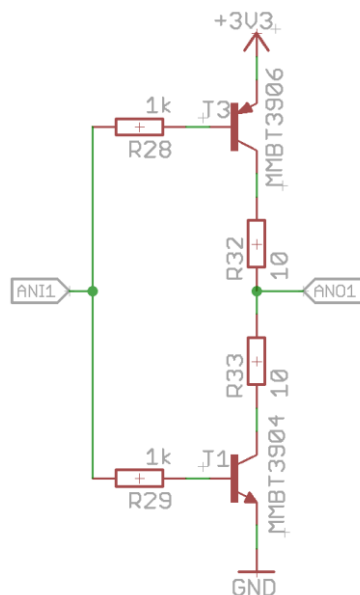
Obrázek 28: Návrh DPS pro zdroj s AMS1117

Podobný zdroj obsahuje i kontrolní modul.

2.2.3 Řízení společné anody

Všechny snímací LED musí mít katodu zapojenou na jeden neobsazený digitální pin mikrokontroléru. Je ale také nutné řídit anody všech LED. Pro katodové snímání a svícení lze používat řídicí piny pro anody ve výstupním režimu. Všechny anody lze zapojit na jediný výstupní pin a řídit jednotlivé LED pouze pomocí jejich katod. Takový anodový řídicí výstup musí ale mít dostatečnou proudovou zatížitelnost. Na jeden mikrokontrolér je ve výsledném návrhu připojeno maximálně 48 snímacích LED. Při proudu procházejícím jednou LED 20 mA je maximální proud procházející společnou anodou přibližně 1 A. Proto je nutné navrhnout také proudový zesilovač, který umožní takový proud poskytnout. Ten je vytvořen pomocí dvojice komplementárních bipolárních tranzistorů a zobrazen na obrázku 29.

Pro snížení celkového proudového odběru terče je proud procházející všemi LED snížen na přibližně 60 mA, což při svícení se všemi LED znamená, že jednou LED prochází proud na 0,66 mA. Použité LED mají tak výborné vlastnosti, že i při tak malém dodávaném proudu stále září s velmi dobrou svítivostí.



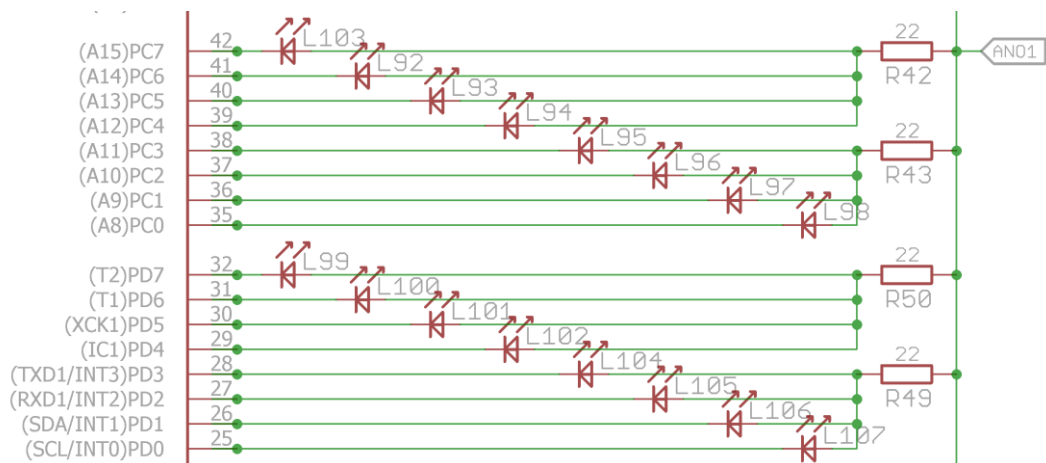
Obrázek 29: Proudový zesilovač pro řízení společné anody LED.

Dále je nutné LED chránit proti zničení vysokým proudem, proto je k nim řazen sériový odpor ve formě rezistoru. Pro jednu LED se jeho hodnota vypočítá vzorcem

$$R = \frac{V_{cc} - V_f}{I_f}, \quad (6)$$

kde R je hodnota odporu sériového rezistoru, V_{cc} je napájecí napětí, V_f je napěťový úbytek na diodě v propustném směru a I_f je proud protékající diodou. Modré LED použité v tomto projektu mají napěťový úbytek od 3 do 3,3 V. Napájecí napětí má také hodnotu 3,3 V, a proto je ochranný rezistor téměř zbytečný. Pro jistotu ale byly rezistory do obvodu přidány. Vzhledem k tomu, že více součástek zvyšuje výrobní náklady a způsobuje méně místa na DPS, bylo určeno, že LED budou spojeny do skupin o maximálně 4 LED, které budou mít 1 společný ochranný rezistor. Zapojení více LED s jedním rezistorem způsobí nárůst procházejícího proudu rezistorem, a tedy větší úbytek napětí. Tím poklesne napětí potažmo proud a intenzita emitovaného světla na každé z LED. Bylo rozhodnuto, že snížení jasu LED při zapojení do skupin o 4 LED je dostatečně malé a snížení počtu rezistorů má pro celý projekt větší hodnotu.

Nejhorší možnou situací je, když svítí pouze 1 ze spojených LED, má proudový odběr 20 mA a její napěťový úbytek je přesně 3 V. Pro takovou situaci je potřeba zapojit ochranný rezistor 15 Ω . Při započítání rezervy pro zvláštní situace a výrobní nepřesnosti byl zvolen rezistor s odporem 22 Ω . Výsledné zapojení snímacích LED je na obrázku 30. Zapojení Schéma z obrázku 30 je pouze ilustrační a neodpovídá výslednému rozmístění LED na jednotlivé piny.



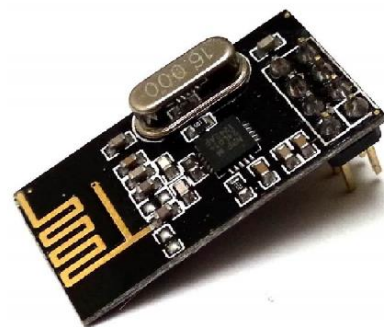
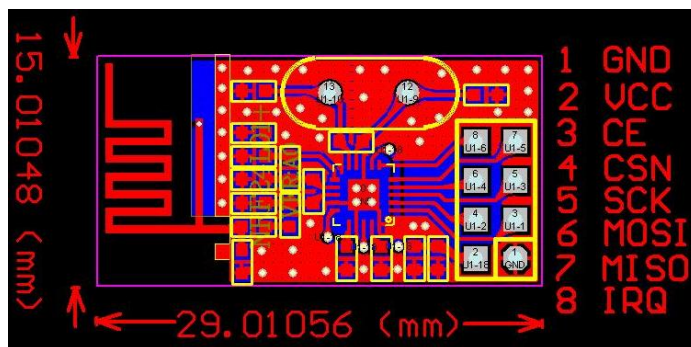
Obrázek 30: Zapojení snímacích LED.

Společná anoda je řízena pinem B0, protože při používání sběrnice SPI na MCU Atmega128A je pin B0 uveden do stavu SS (slave select). Pokud by byl pin uveden do vstupního stavu a zároveň by se na pinu objevila logická hodnota 0, celý mikrokontrolér by se choval jako slave zařízení pro komunikaci přes sběrnici SPI. Proto je na tento pin připojena společná anoda, která bude vždy ve výstupním režimu příslušného pinu a nežádoucí „slave stav“ nikdy nenastane.

2.2.4 Komunikace na hardware úrovni

Modul terče obsahuje 2 mikrokontroléry Atmega128A. Jeden mikrokontrolér je označen jako hlavní (IC MAIN) a druhý jako vedlejší (IC 2). Tyto dva mikrokontroléry spolu komunikují pomocí jednoho vodiče a nově vytvořeného protokolu jednodrát, který je popsán v kapitole 2.5.1. IC MAIN má navíc jeden GPIO vyveden na pin RESET IC 2 a je tak schopen vedlejší mikrokontrolér uvést do úvodního stavu. Veškerou komunikaci s dalšími moduly obstarává IC MAIN, a to přes jednodrátovou nebo bezdrátovou komunikaci.

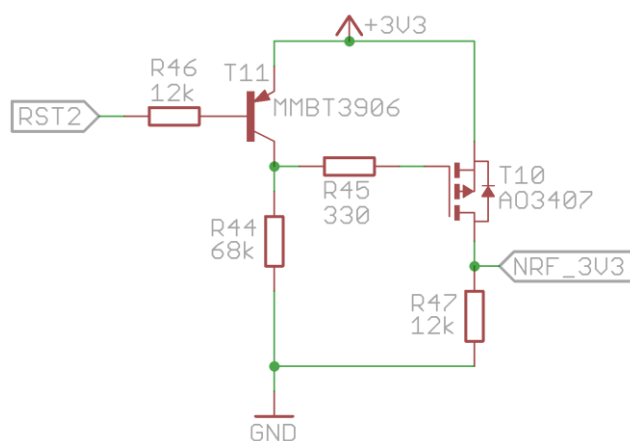
Bezdrátovou komunikaci obstarává modul s nRF24L01+. Tento čip zprostředkovává bezdrátovou komunikaci v pásmu ISM 2,4 GHz s přenosovou rychlostí až 2 Mbps. Podporuje napájecí napětí od 1,9 do 3,6 V a má relativně nízkou spotřebu. Cena čipu se pohybuje okolo 20 Kč, a proto je tento modul jedním z nejvyužívanějších bezdrátovým modulem pro IoT aplikace posledních let. V tomto projektu je používán hotový modul s nRF24L01+ připraven pro komunikaci po sběrnici SPI (viz obrázek 31).



Obrázek 31: Bezdrátový modul s nRF24L01+ (převzato z [23]).

Hardwarově je k modulu třeba připojit pouze externí filtrační kondenzátor (nebo skupinu kondenzátorů), protože bezdrátový modul je velmi citlivý na elektromagnetické rušení. Piny 3 až 8 (viz obrázek 31) jsou připojeny k odpovídajícím pinům IC MAIN. Piny 3 až 7 obsluhují komunikaci přes sběrnici SPI a pin 8 (IRQ) je nastavitelný indikátor přerušení, který je připojen na IC MAIN na pin ovládající externí přerušení.

Problém s tímto čipem je, že nemá pin pro hardware reset. IC MAIN musí mít možnost resetovat všechny části jednoho terče včetně bezdrátového modulu. Proto byl navrhnout resetovací obvod tvořen PNP a PMOS tranzistorem. Při resetování probíhá vybíjení kapacity mezi sítí 3V3 (napájecí napětí) a GND (společná zem), proto úplné resetování modulu trvá mezi 50 a 150 ms. Po 150 ms je nRF24L01+ vždy spolehlivě resetován.

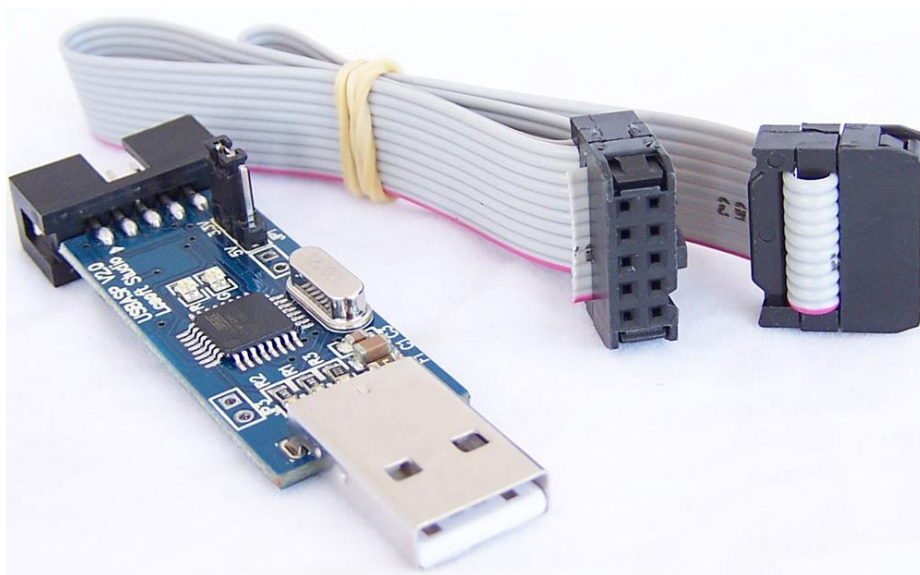


Obrázek 32: Resetovací obvod pro nRF24L01+

2.2.5 Programování, programovací piny

Všechny mikrokontroléry v celém projektu využívají k nahrávání nového firmware systém sériového programování přes sběrnici SPI. Nahrávání programu obstarává modul USB ASP, který je řízen z počítačové aplikace eXtreme Burner. Celý programovací proces probíhá automaticky při propojení linek MOSI, MISO, SCK, RST,

GND a VCC na příslušné piny mikrokontroléru. U MCU Atmega128A se jedná o jiné piny, než které byly použity pro komunikaci s bezdrátovým modulem. Cesty GND, VCC a SCK mohou být společné pro oba mikrokontroléry, ostatní 3 nemohou být propojeny. Proto je na DPS nutné mít 3 programovací konektory, 1 se společnými linkami a 1 s linkami, které nelze spojit, pro oba mikrokontroléry.



Obrázek 33: USB ASP (převzato z [24]).

2.2.6 Návrh DPS

Deska plošných spojů byla pro modul terče navržena jako dvouvrstvá s rozměry 10 x 10 cm kvůli levné prototypové výrobě právě tohoto typu DPS. Na horní straně DPS je umístěno snímací pole o průměru 88 mm, patice pro bezdrátový modul a programovací konektory. Na spodní straně jsou oba mikrokontroléry, konektory pro napájecí adaptér, napájecí akumulátory a ethernet, přepínač on/off, převodník napájecího napětí s AMS1117 a ostatní „doprovodné“ součástky. V rozích DPS jsou 4 montážní díry s rozměrem M4 pro upevnění v krabici.

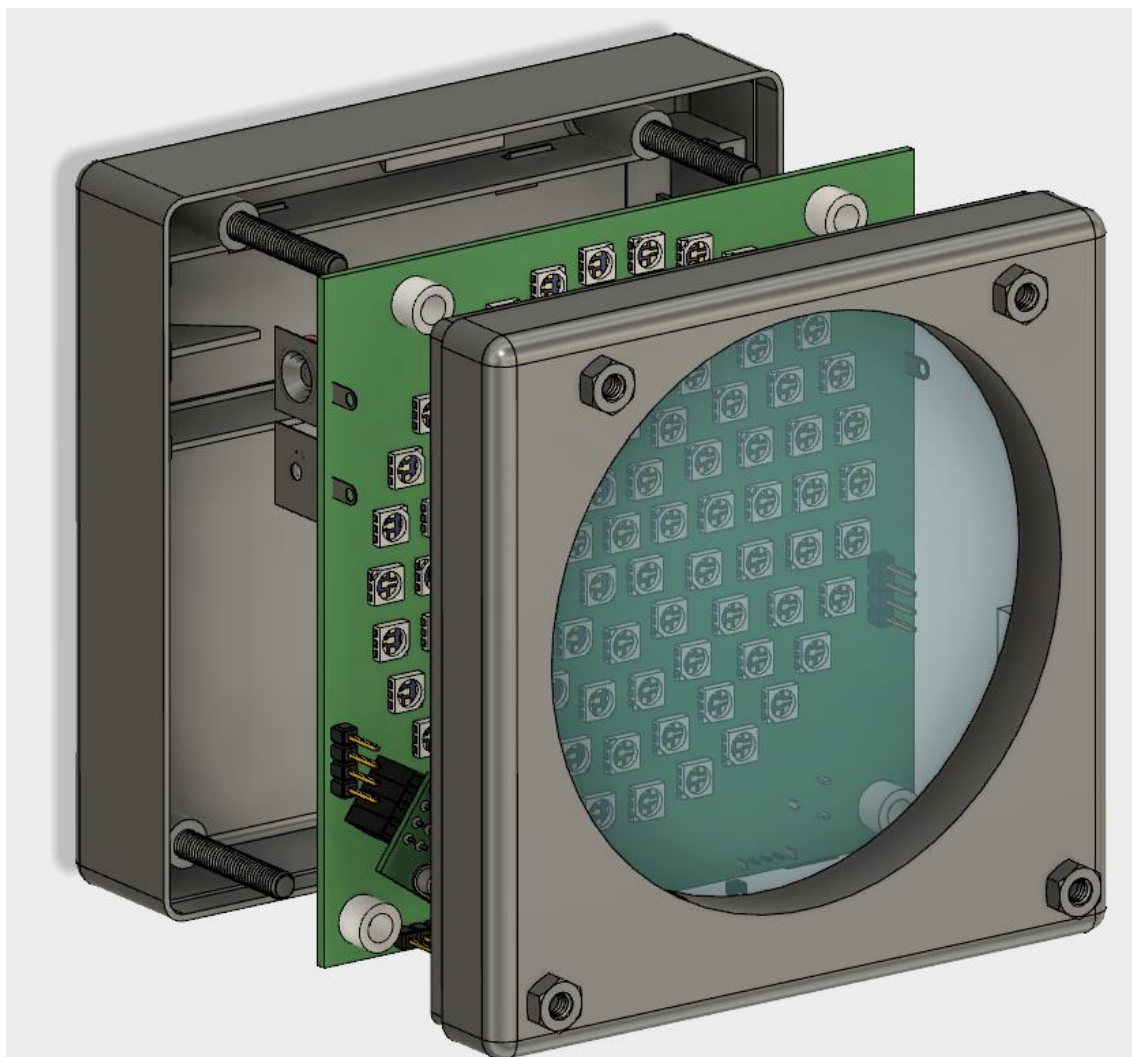
Kvůli šetření místa na DPS byly odstraněny externí oscilátory pro MCU. Mikrokontroléry používají své interní oscilátory s frekvencí 8 MHz. Všechny součástky, u kterých to mělo význam, jsou převedeny do SMD podoby. V THT verzi jsou na desce pouze konektory a patice, u kterých je nutná mechanická pevnost. Návrh DPS je vytvořen v programu Eagle (platí pro všechny DPS v této práci). Návrh DPS je vyobrazen na obrázcích v příloze B.

2.2.7 Návrh krabičky

Krabíčka pro terč byla navržena v programu Fusion 360. Obsahuje 3 části – kryt přední

a zadní strany a kryt pro výměnu akumulátorů. Krabíčka je vhodná pro výrobu technologií 3D tisku. Pomocí drobných úprav lze návrh převést do stavu pro výrobu injekčním vstřikováním, která je nezbytná pro výrobu většího počtu kusů.

V předním krytu je prostor pro plexisklo, které by mělo zlepšit odolnost snímání vůči okolnímu záření díky výraznému útlumu intenzity záření v UV části spektra. Krabíčka respektuje rozložení konektorů a v zadním krytu má otvor pro výměnu baterií krytý separátním krytem.



Obrázek 34: Návrh krabíčky pro modul terče.

2.2.8 Firmware terče

Celý program pro oba mikrokontroléry v terči typu Atmega128A je napsán v jazyce C v prostředí AVR studio 5.1. Firmware je pro oba mikrokontroléry terče totožný. V úvodní fázi je komunikací mezi nimi zajištěno, že si automaticky přidělí role, tedy

zjistí, který z nich je IC MAIN a který je IC 2.

Program začíná inicializací GPIO pinů mikrokontroléru. Poté probíhá inicializace 2 šestnáctibitových a 1 osmibitového čítače / časovače. Dalším krokem je reset druhého mikrokontroléru a bezdrátového modulu nRF24L01+. Reset je proveden v obou mikrokontrolérech, ale pouze na pinech hlavního mikrokontroléru IC MAIN jsou hardwarově připojeny resetovací linky. Reset je důležitý pro synchronizaci dalších akcí. Poté si mikrokontroléry vzájemnou komunikací rozdělí role na IC MAIN a IC 2.

IC MAIN provede inicializaci bezdrátového modulu nRF24L01+. Poté oba mikrokontroléry čekají na připojení ke zbraňi nebo ke kontrolnímu modulu. Pokud je některé z těchto zařízení zapnuto, připojení se provede okamžitě. Preferovaným připojením je to ke kontrolnímu modulu neboť ten může připojit i zbraň i terč. Připojení může proběhnout přes ethernetový kabel pomocí nově vytvořeného protokolu jednodrát nebo pomocí bezdrátových modulů nRF24L01+.

Po připojení musí terč získat informaci o požadovaném střeleckém režimu (podrobnosti v kapitole 2.6). Získá ji buď z kontrolního modulu, nebo sám vyhodnotí, že je třeba spustit režim bez kontrolního modulu. Poté následuje kalibrace na úroveň okolního jasu, které je věnovaná samostatná kapitola 2.2.9. Terč je pak ve stavu připraveném na střelbu. To znamená, že periodicky nabíjí snímací LED a zkoumá určitý čas, jestli není některá z nich vybitá. Po každém cyklu na malý okamžik (v řádu desítek mikrosekund v závislosti na okolním jasu) rozsvítí krajní prstenec a někdy i středovou LED, takže se tyto LED jeví pro lidské oko jako trvale svítící. U toho hlavní mikrokontrolér IC MAIN ještě kontroluje komunikační kanály s vedlejším mikrokontrolérem IC 2 a kontrolním modulem.

Při zasažení terče laserem se vybije jedna z LED a mikrokontroléry vyhodnotí, která to byla, přiřadí ji odpovídající počet bodu a pokud přijde signál o výstřelu, zasaženou LED rozsvítí a IC MAIN posílá informaci do kontrolního modulu. Takto střelba pokračuje až do vyčerpání přidělených střel nebo do signálu STOP z kontrolního modulu. Tehdy terč rozsvítí všechny LED trefené v posledním kole. Další příchozí signál střela znamená vrácení terče do stavu po přihlášení.

2.2.9 Kalibrace terče na okolní jas

Nejzajímavější částí firmwaru terče je funkce pro kalibraci terče na okolní jas. Jedna z největších konkurenčních výhod tohoto zařízení je možnost jej používat i při relativně silném okolním světle, což umožňuje zejména střelbu ve venkovních prostorech. Odolnost proti okolnímu ozáření je zajištěna jak hardwarově (princip katodového snímání a plexisklo), tak softwarově. Terč se v různých situacích přizpůsobí okolním podmínkám.

Pro kalibraci je používáno přímo principu katodového snímání na portu C hlavního mikrokontroléru, na který je připojeno 8 LED. Všechny tyto LED jsou nabity stejně jako při střelbě a poté mikrokontrolér měří, jak rychle se vybití první z těchto LED. Takových měření provede 10 a výsledky zapisuje do měřicího pole. Pokud čas dosáhne 15 ms a žádná LED stále není vybitá, dané měření ukončí a zapíše 15 ms. To je totiž čas, kdy je kolem terče tak slabé okolní světlo, že nemá cenu měřit dále. Všechny těchto 10 výsledků je pak seřazeno od největšího po nejmenší a z 6 prostředních výsledků je vypočítána průměrná hodnota. Tato hodnota je ještě podělena kalibračním koeficientem tak, aby se pokryly výrobní rozdíly a hodnota platila pro všechny LED na terči.

Výsledkem kalibrace je číslo od 1 do 10, kde 1 znamená nejvyšší intenzitu okolního jasu. Toto číslo je pak zapsáno jako maximální čas v milisekundách, po který terč čeká na vybití některé z LED při střelbě. Z toho vyplývá, že v horších podmínkách, tedy při silnějším jasu okolního světla jsou zároveň větší požadavky na výkon laseru a to může snižovat spolehlivost střelby. Nicméně výsledkem je fakt, že terč funguje precizně v dobrých podmínkách a velmi dobře ve špatných podmínkách, což je pořád lepší než veškerá konkurence.

Kalibrace probíhá před začátkem střelby a po každé střele, nebo pokud se okolní podmínky změní natolik, že se vybití některá z LED mimo výstřel. V takovém případě terč blikne na znamení, že se překalibroval na novou hodnotu a střelbu to nijak neovlivní, pokud střela nepříjde v čase nové kalibrace, který je maximálně 150 ms.

Zařízení bylo testováno na odolnost vůči okolnímu osvětlení. K měření byl použit kapesní luxmetr HS1010. Terče byly umísťovány na různá místa, na kterých byl bezprostředně předtím změřená intenzita osvětlení zmíněným luxmetrem. Všechny terče byly schopny naplno fungovat do hodnoty 20 000 lx. Této hodnoty bylo dosaženo pouze při přímém osvětlení Sluncem, čili v praxi to znamená, že kdekoli mimo přímý sluneční svit terče fungují spolehlivě.

2.3 Návrh modulu do zbraně

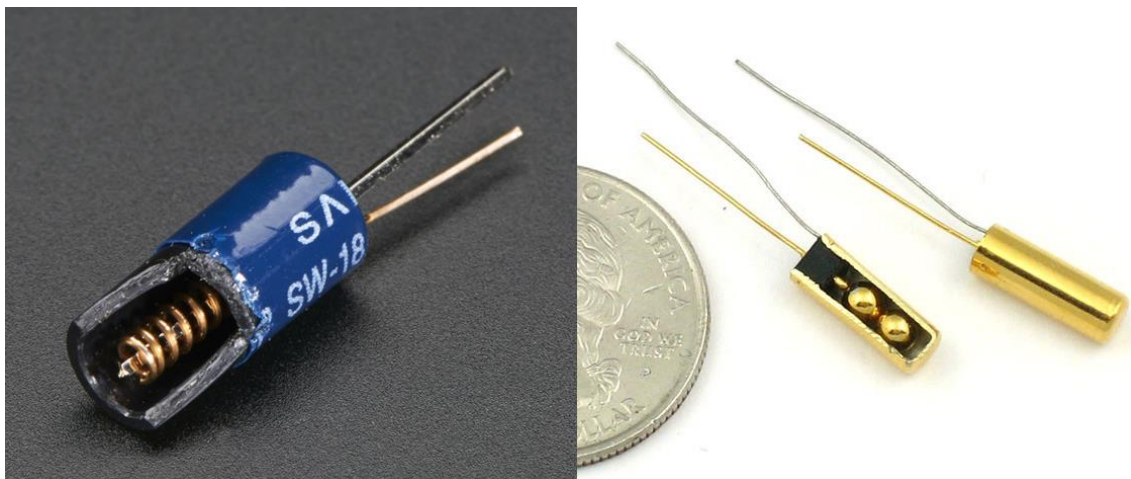
Modul do zbraně má být zařízení, které vysílá laserový paprsek na základě podnětu ze zbraně. Rozměry a hmotnost by měly být co nejmenší, aby nebyla narušena věrohodnost s klasickou střelbou. Pro možnost sériové strojové výroby takového modulu je nutné, aby byl navržen tak, že jeho montáž ke zbrani bude co nejméně časově a dovednostně náročná. Zbraň není možné při výrobě demontovat ani nijak zasahovat do jejích vnitřních částí. Není tedy možné využít mechanického tlačítka na spoušti, jak tomu bylo u dosavadních prototypů. Ke snímání výstřelu je nutné využít jiných vlastností zbraně.

Zbraň také využívá bezdrátový modul nRF24L01+ pro komunikaci s terčem nebo řídicím modulem. Opět je zde využit mikrokontrolér z rodiny Atmega, tentokrát jednodušší Atmega8A. Stejně jako v případě terče je programována pomocí SPI sériového programování. Tentokrát jsou ale piny pro programování shodné s piny pro bezdrátovou komunikaci. Procesy se navzájem neovlivňují a naopak je této vlastnosti využito k ušetření místa na DPS, neboť konektor pro připojení bezdrátového modulu zároveň slouží jako programovací.

2.3.1 Snímání otřesů

Stěžejním návrhovým problémem pro modul do zbraně je získání informace o výstřelu bez mechanického zásahu do zbraně. Každá zbraň, i při výstřelu na prázdko, provede jistý reprodukovatelný pohyb, ať už je to klepnutí úderníku u klasických zbraní nebo naraz pružiny u airsoftových zbraní. Tento otřes lze snímat elektrickými součástkami.

Ke snímání rychlých pohybů lze využít několik různých součástek. Existují například speciální senzory otřesů a vibrací, a to ve dvou základních konfiguracích – pružinové a kuličkové. U obou typů senzorů dojde k mechanickému spojení vodivých částí vnitřnímu propojení vývodů součástky. Pružinový senzor má jeden vývod připojen k pružině omotané kolem druhého vývodu. Při správném otřesu se pružina ohne a dotkne se vývodu, čímž se propojí oba vnější vývody. V kuličkovém senzoru je propojení realizováno pomocí volně se pohybujících kovových kuliček. Součástky jsou velice levné, ale snímání výstřelů pomocí tohoto způsobu nemělo dostatečnou spolehlivost.

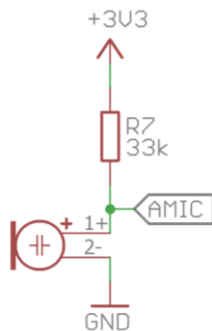


Obrázek 35: Pružinový a kuličkový senzor otřesu (převzato z [25]).

Další testovanou možností byly akcelerometry a gyroskopy. Akcelerometr je součástka snímající zrychlení a gyroskop snímá točivý moment. Obě tyto součástky jsou často integrované v jednom čipu s milimetrovými rozměry a můžeme je nalézt jako snímače pohybu například v chytrých telefonech. Důkladnému testování byl podroben čip MPU 6050, který byl vybrán pro svou nízkou cenu oproti svým konkurentům. Při měření testovacích modulu zbraní s tímto čipem byla získána kvalitní data a bylo možno rozeznat výstřel od ostatních pohybů s úspěšností přes 99%. Použití v projektu brání cena tohoto řešení. Tato součástka se prodává za cenu okolo 50 Kč, což je dobrá cena v porovnání s ostatními akcelerometry/gyroskopy, ale stále vysoká cena oproti vítěznému řešení.

Nejlepší poměr mezi spolehlivostí snímání výstřelu a cenou nabízí řešení snímání dění na elektretovém mikrofону analogovým vstupem mikrokontroléru. Elektretový mikrofón je typem kondenzátorového mikrofónu, u kterého akustické kmity rozechvívají membránu, která je jednou z elektrod kondenzátoru. Změna polohy membrány způsobuje změnu kapacity mikrofónu [26]. Elektretové mikrofóny vyžadují k funkci vnější napájení.

V tomto projektu byl nejprve sestaven analogový zesilovač k mikrofónu, ale bylo zjištěno, že otřesy způsobené zbraněmi jsou natolik silné, že zesílení je spíše nežádoucí, protože měřený signál byl díky zesílení výrazně saturovaný. Je tedy použit nejjednodušší způsob napájení a snímání na mikrofónu pomocí rezistoru (viz obrázek 36). Zapojení funguje jako dělič napětí mezi mikrofónem a rezistorem. Při zapojení rezistoru s hodnotou odporu 8,2 k Ω je stejnosměrné napětí na síti AMIC (analogový vstup mikrokontroléru) přibližně 1,6 V. Hodnota odporu rezistoru určuje citlivost mikrofónu. Při nízké hodnotě odporu (menší než 15 k Ω) je citlivost vysoká a měření se zbraní vykazuje saturované výsledky.

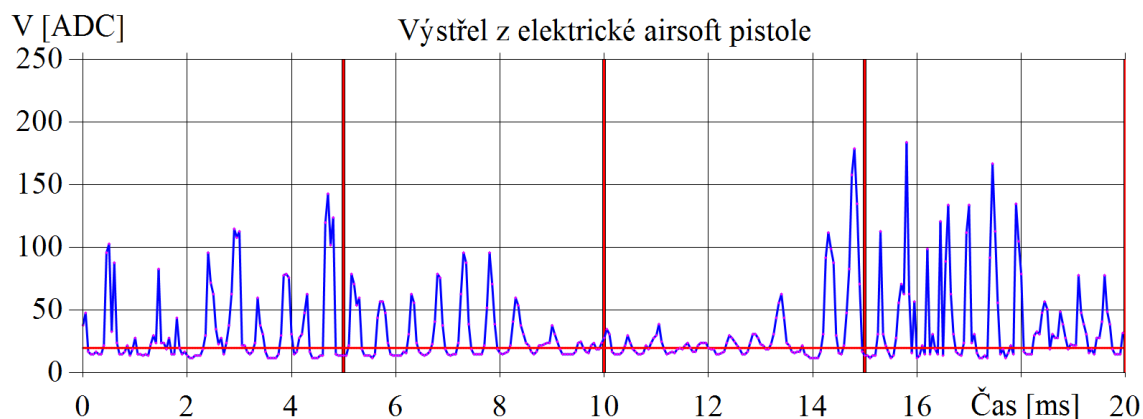


Obrázek 36: Zapojení elektretového mikrofonu.

Při zapojení rezistoru s odporem $67\text{ k}\Omega$ jsou již výsledky satureované jen minimálně nebo vůbec. Dělič je v této konfiguraci sice velmi nevyvážený a stejnosměrné napětí na výstupu je menší než 50 mV , což způsobí ztrátu záporných půlvln signálu. Nesatureované výstupy jsou ale důležitějším prostředkem pro snímání výstřelů. Ve finálním zbraňovém modulu je u mikrofonu připojen rezistor $33\text{ k}\Omega$.

Spousta zbraní má zvukovou vlnu svého výstřelu velmi slabou. To znamená, že měřené hodnoty se pohybují v rozmezí přibližně 10 z 255 hodnot měřitelných ADC mikrokontroléru. Pro snadnější použití těchto zbraní je možné aktivovat vnitřní pull-up rezistor softwarově v mikrokontroléru. Hodnota pull-up rezistoru se pohybuje od $20\text{ k}\Omega$ do $50\text{ k}\Omega$, tedy paralelní kombinace externího a interního pull-up rezistoru bude mít odpor v rozmezí $12,5\text{ k}\Omega$ až $19,9\text{ k}\Omega$. Tyto 2 nastavitelné hodnoty budou použity pro různě citlivé zbraně.

Signál z mikrofonu je pak zpracován v mikrokontroléru a pomocí speciálního algoritmu je zjištěno, jestli daná zvuková vlna odpovídá výstřelu nebo jiné události.



Obrázek 37: Příklad grafu průběhu napětí na mikrofonu v čase.

Graf na obrázku 37 zobrazuje jeden z možných průběhů naměřených na mikrofonu v časovém úseku 20 ms. Napětí je měřeno pomocí analogově-digitálního převodníku mikrokontroléru Atmega8A. Převodník je nastaven na osmibitovou hodnotu, proto jsou

výsledky zobrazeny na relativní lineární stupnici od 0 do 255. Hodnota 255 odpovídá napájecímu napětí mikrokontroléru, tedy 3,3 V. Rychlost snímání je 20 kS/s (20 000 vzorků za sekundu). Měření bylo provedeno bodově a jednotlivé body propojeny lineárními spojnici pro naznačení průběhu signálu.

Mikrofon je v modulu zbraně umístěn tak, že jeho membrána je kolmá na osu hlavně zbraně. Mikrofon tedy snímá zejména údery, které přijdou právě v této ose a je velmi odolný na boční nárazy. Silný boční náraz se směrem mimo hlavní osu je i při zvýšené citlivosti zaznamenán velmi slabě. Nebezpečí zaznamenání výstřelu je při nabití zbraně, protože tento pohyb je také ve směru hlavní osy mikrofonu, ale amplituda tohoto signálu je výrazně nižší než amplituda při výstřelu.

Hardwarové náklady tohoto řešení jsou přibližně 1 Kč a je tedy jasné, že toto je nejvhodnější řešení snímání výstřelů.

2.3.2 Napájení

Celkové rozměry modulu do zbraně je nutné udržet na minimu, proto i zdroj energie musí být fyzicky malý. Při zachování rozumných výrobních nákladů modulu přichází v úvahu 2 varianty. První z nich je použití knoflíkových baterií jako například CR2032. Ty jsou velmi malé i levné, ale jsou určeny pro aplikace s minimálním proudovým odběrem. Poskytované napětí je 3 V, kapacita baterií se pohybuje od 50 do 300 mA. U modulu do zbraně lze očekávat proudový odběr v pracovním režimu okolo 10 mA. Vrcholové hodnoty proudového odběru mohou při používání laseru a bezdrátového modulu dosahovat i 100 mA. Pokud by knoflíková baterie zvládala takové vrcholové hodnoty, pravděpodobně by to snižovalo její výdrž i životnost. Proto je vhodnější druhá varianta zdroje energie a to akumulátor LiPO (lithium - polymerové). Ty jsou dnes běžně používány v přenosné elektronice a jsou nejvhodnějším řešením i zde.

Jako nejlepší kompromis mezi kapacitou, cenou a rozměry byl označen akumulátor LiPO s kapacitou 100 mAh a napětím 3,7V. Výhodou jsou obdélníkové rozměry 19 x 15 x 7,5 mm, které se hodí k celkové koncepci modulu. Další předností je možnost nabíjení akumulátoru, a tedy snížení provozních nákladů. Akumulátor je určen pro sériově vyráběné kvadrikopty, což se odráží v jeho příznivé ceně.

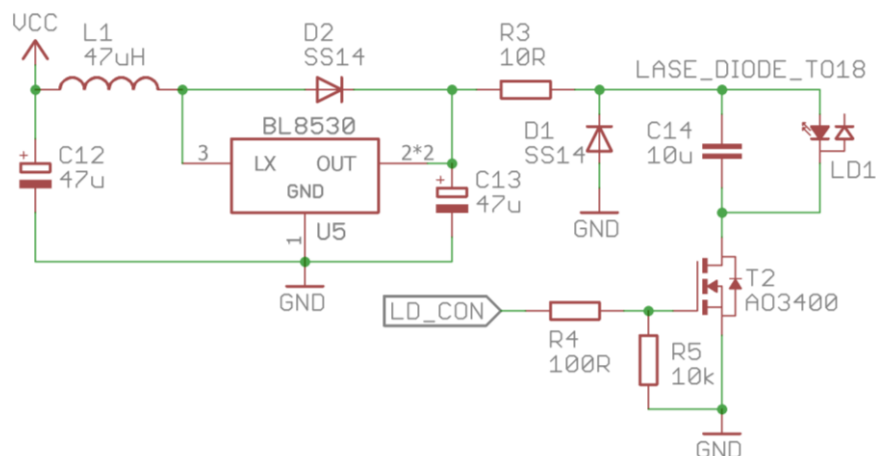


Obrázek 38: Akumulátor použitý v modulu do zbraně (převzato z [27]).

Napětí na akumulátoru je proměnlivé v závislosti na stavu nabití. Při plném nabití je na akumulátoru napětí až 4,2 V a stále pracuje při 3,6 V. Bezdrátový modul nRF24L01+ netoleruje napájecí napětí vyšší než 3,6 V, proto je nutné napětí akumulátoru regulovat, a to nejlépe na 3,3V. K tomu by vybrán lineární regulátor XC6206P332MR, který má úbytek napětí ze vstupu na výstup při proudovém odběru 100 mA pouze 250 mV. Může nastat situace, kdy bude třeba regulovat napětí 3,6 V na 3,3 V a v tu chvíli, je nízká hodnota úbytku napětí důležitá.

2.3.3 Nabíjecí obvod k akumulátoru

Akumulátor je nutné jednou za čas nabít, a aby nemuseli zákazníci modul demontovat k odpojení a nabití akumulátoru, je na DPS zbraňového modulu navrhnut nabíjecí obvod s vyvedeným microUSB konektorem na kostru modulu. Nabíjení lithiových akumulátorů se musí řídit jistým postupem, jinak může dojít ke snížení životnosti, kapacity akumulátoru, nebo dokonce ke vznícení či výbuchu. Nejprve je třeba akumulátor nabíjet konstantním proudem, kdy se zvyšuje napětí a poté konstantním napětím a snižujícím se proudem. V dnešní době existuje celá řada integrovaných obvodů určená k řízení nabíjení lithiových akumulátorů. Jedním z nich je i TP4056, který je použit v modulu do zbraně.



Obrázek 40: Obvod pro řízení laserové diody.

2.3.5 Návrh DPS

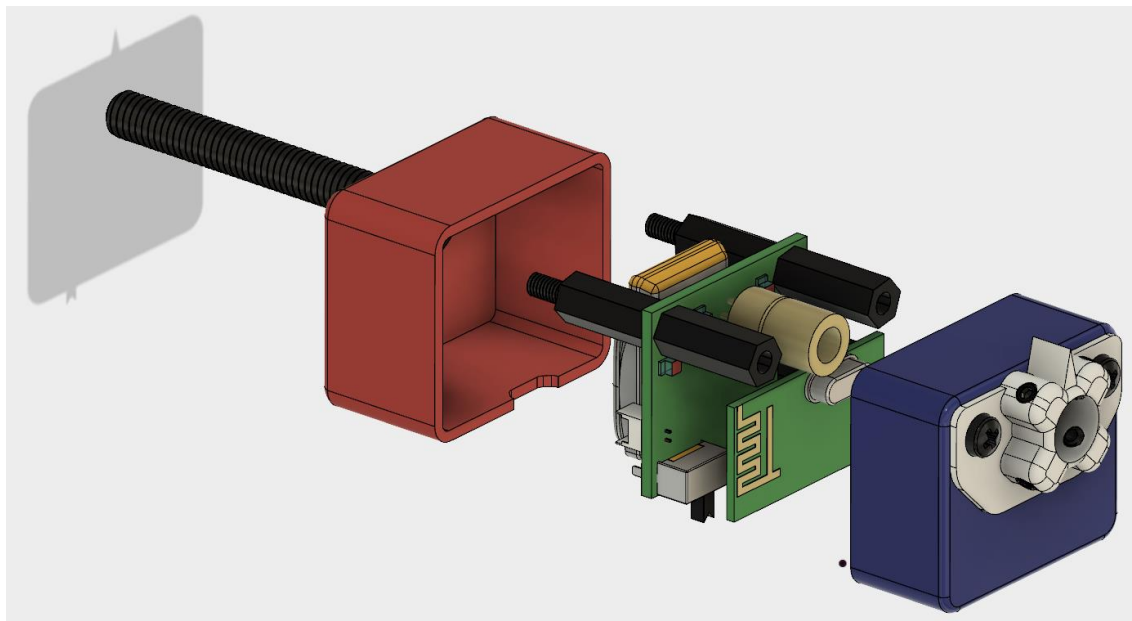
DPS je opět vytvořena jako dvouvrstvá. Velký důraz je zde kladen na co nejmenší rozměry. V zájmu minimalizace rozměrů by mohlo být výhodnější navrhnout na DPS bezdrátové řešení sestavené podle výše zmíněného IC nRF24L01+. Druhá možnost je použít opět kompletní bezdrátový modul zasazený do patice připojené k DPS. Ukázalo se, že návrh bezdrátového modulu přímo na DPS snížil hloubku zařízení asi o 10 mm, ale šířka i výška se nezmenšily, neboť obě strany DPS již byly hustě osazeny součástkami a byly na hranici výrobitelnosti (s danými omezenými parametry pro nízkou cenu). Bezdrátový modul je tedy na DPS opět připojen přes patici. Použití hotového modulu je také výhodnější pro případnou certifikaci, která je při vstupu na trh povinná pro zařízení používající bezdrátový přenos dat.

Na jedné straně DPS tedy musí být bezdrátový modul nRF24L01+ a laserová dioda. Těmito dvěma prvky je omezena minimalizace rozměrů. Šířka DPS je tedy stejná jako délka bezdrátového modulu a výška DPS odpovídá šířce bezdrátového modulu a průměru laserové diody (viz obrázek 41 a příloha B). Výška DPS je také omezena rozměry akumulátoru, proto výsledné rozměry desky 30 x 25 mm jsou v této koncepci nejmenší možné. Návrh DPS je vyobrazen na obrázcích v příloze B.

2.3.6 Návrh krabičky

Krabička je opět navržena tak, aby celkové rozměry byly co nejmenší. Skládá se ze 3 dílů. Zadní kryt obsahuje otvor na šroub, který slouží k upevnění celého modulu do zbraně. K přednímu i zadnímu krytu je DPS uchycena pomocí distančních sloupků M3. Na přední kryt je upevněna třetí část krabičky. Ta slouží pro aretaci laserové diody pomocí aretačních šroubků. Uživatel si tak může sám zkalibrovat směr laserového paprsku a vykompenzovat tak výrobní nepřesnosti. To provede tak, že laserový modul

zasune do zbraně, modul zapne a 3 krát klepne do krabičky ve směru nejlepšího snímání mikrofonu. Tím se aktivuje režim trvalého svícení laseru a uživatel může paprsek sesouhlasit s mířidly zbraně. Celkový návrh krabičky a DPS je zobrazen na obrázku 41.



Obrázek 41: Návrh krabičky modulu do zbraně.

2.3.7 Firmware modulu do zbraně

Program pro mikrokontrolér, kterým je zde Atmega8A opět začíná inicializací GPIO, čítačů / časovačů, ADC a bezdrátového modulu nRF24L01+. Poté mikrokontrolér zjišťuje, jestli má v EEPROM zapsané údaje o zbraní, na kterou je aktuálně modul zkalibrován. Pokud ne, provede kalibraci.

Následuje připojovací fáze, kdy se modul snaží připojit k terči nebo kontrolnímu modulu. Až se tak stane, modul okamžitě začíná snímat dění na mikrofonu. Ve chvíli, kdy vyhodnotí, že zvuková vlna na mikrofonu odpovídá hodnotám pro danou zbraň, vyšle laserový paprsek a informaci o výstřelu skrz nRF24L01+. V tomto chodu pokračuje, dokud není modul vypnut nebo není ztraceno připojení k terči nebo kontrolnímu modulu.

2.3.8 Kalibrace na novou zbraň

Stěžejní částí návrhu modulu do zbraně a celé diplomové práce byla tato kalibrace na novou zbraň. Jedním ze základních požadavků v zadání bylo, aby bylo možné spolehlivě rozeznávat výstřely z různých zbraní a oddělit je od ostatních událostí. K tomu slouží tento složitý algoritmus. Jeho výsledkem je pole o 28 osmibitových

hodnotách, které charakterizují zvukové vlny výstřelu z dané zbraně.

V příloze C jsou zobrazeny grafy průběhů napětí na mikrofonu změřené analogovým pinem mikrokontroléru přímo v hotovém modulu za prvních 20 ms od zmáčknutí spouště. Jedná se o 3 výstřely z manuální airsoftové zbraně, která má velmi silný náraz, a proto má zvuková vlna vysokou amplitudu. Dále pak 3 výstřely z elektrické airsoftové zbraně, která má nárazy znatelně slabší, ale její průběh je dostatečně reprodukovatelný. V poslední části přílohy jsou 3 grafy různých událostí, které naopak modulu musí vyhodnotit jako „nevýstřely“.

Samotná kalibrace začíná změřením klidové hodnoty napětí na mikrofonu. Je provedeno 5000 čtení hodnot z ADC na mikrofonu za dobu 250 ms. Mikrokontrolér si zapisuje četnost jednotlivých výsledků. Za klidovou hodnotu je považováno číslo, které se vyskytuje v tomto změřeném souboru alespoň 2000 krát. Vzhledem k tomu, že je použito osmibitové rozlišení, často se stává, že je všech 5000 vzorků se stejnou změřenou hodnotou. Z měření také vystupují hodnoty maximální a minimální úrovně napětí v klidovém stavu a vypočítaná hodnota minimálního napětí `klid_max2`, která musí být překročena, aby mikrokontrolér začal vyhodnocovat, zda se jedná o výstřel nebo ne. Je to jednoduše dvojnásobek maximální naměřené hodnoty z těch 5000 vzorků. Toto jsou tedy první 4 hodnoty, které jsou součástí výsledkového pole. V aktuální konfiguraci je nejčastější změřená klidová hodnota 22, což odpovídá napětí 0,285 V. Klidovou hodnotu lze vidět na grafu nabití zbraně v příloze E.3.

Po změření klidové hodnoty čeká modul na to, až se na mikrofonu objeví napětí vyšší než je hodnota `klid_max2` vypočítaná v předchozím kroku. Až se tak stane, mikrokontrolér nasnímá 400 vzorků s rozestupem 50 μ s, tedy měření trvá dohromady 20 ms. Poté analyzuje naměřená data. Zvuková vlna je rozdělena do 4 stejně dlouho trvajících částí po 5 ms. Každá z těchto částí je analyzovaná zvlášť, ale stejným způsobem jako ostatní. V každé části se vyhledávají vrcholové hodnoty a jejich počet se ukládá. Aby byla hodnota označena jako vrchol, musí být lokálním maximem ze 7 hodnot (jsou započítány 3 hodnoty před a 3 po právě analyzované hodnotě), musí po ní následovat pokles zvukové vlny pod polovinu této hodnoty a po tomto „dnu“ musí opět přijít další lokální maximum, jehož hodnota je již počítána složitějším způsobem. To vše musí proběhnout v následujících 20 vzorcích po aktuálně analyzované hodnotě.

Pro každou časovou oblast jsou takto získané hodnoty počtu validních vrcholů, maximální a minimální a průměrná hodnota vrcholu a maximální hodnota dna. Tyto informace tedy modul získává z jedné střely. Po střele následuje 5 sekundová prodleva na to, aby případné nabití zbraně nezasahovalo do kalibrace. Poté je stejným způsobem provedeno dalších až 9 střel. Výsledek nové střely je průměrován s výsledky předchozích střel, pokud se nejedná o střelu, která by byla velmi nepodobná s předchozími. Taková střela se z kalibrace vyřadí.

Z tohoto měření 10 střel se vypočítá 24 hodnot (6 hodnot pro 4 časové oblasti), které dohromady se 4 klidovými hodnotami dávají kalibrační výsledkové pole pro danou zbraň. Tyto hodnoty se zapíší do EEPROM a při dalším spuštění zbraňového modulu si je mikrokontrolér z EEPROM vyčte a kalibraci tak není třeba opakovat po každém spuštění.

S manuální zbraní, jejíž grafy jsou v příloze E.1 bylo provedeno přibližně 250 výstřelů v různých podmínkách a pouze 1 nebyl zaznamenán. Spolehlivost této metody je tedy okolo hodnoty 99,6%. I přes velkou snahu se nepodařilo zkalibrovaný modul ošálit natolik, aby spustil výstřel laserem bez výstřelu ze samotné zbraně. S elektrickou zbraní byly výsledky podstatně horší. Úspěšnost rozpoznání výstřelu je opět vysoká, ale odolnost vůči nežádoucím výstřelům je výrazně snížena kvůli nízké amplitudě vrcholů v jejich zvukových vlnách.

2.4 Návrh kontrolního modulu

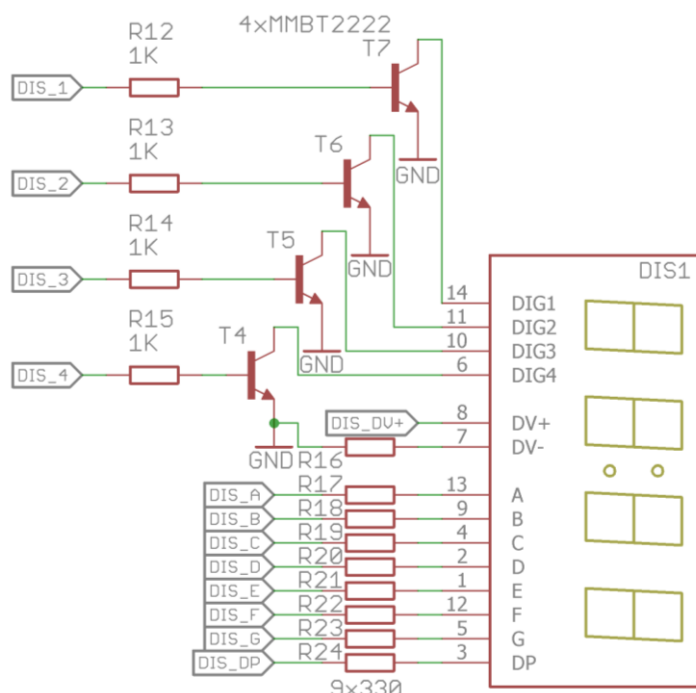
Kontrolní modul má za úkol zprostředkovávat komunikaci mezi zbraněmi, terči a podávat střelcům informace o jejich střelbě. Elektronická část je opět sestavena okolo mikrokontroléru Atmega128A. Obsahuje také nRF24L01+ a jeho resetovací obvod. Napájecí zdroj je obdobou zdroje v terči, pouze místo možnosti napájení ethernetovým kabelem je zde možnost napájet modul kabelem přes microUSB konektor. Tyto části jsou podrobněji popsány v kapitole 2.2.

Pro nastavení střelby je zde 5 tlačítek, z nichž 4 jsou připojena přímo na digitální piny mikrokontroléru (jsou aktivované vnitřní pull-up rezistory) a páté tlačítko je napojeno na resetovací pin mikrokontroléru. Dále návrh obsahuje 6 ethernetových konektorů, na které je vyvedeno napájení a 2 komunikační linky pro propojení s 5 terči a jedním dalším zařízením.

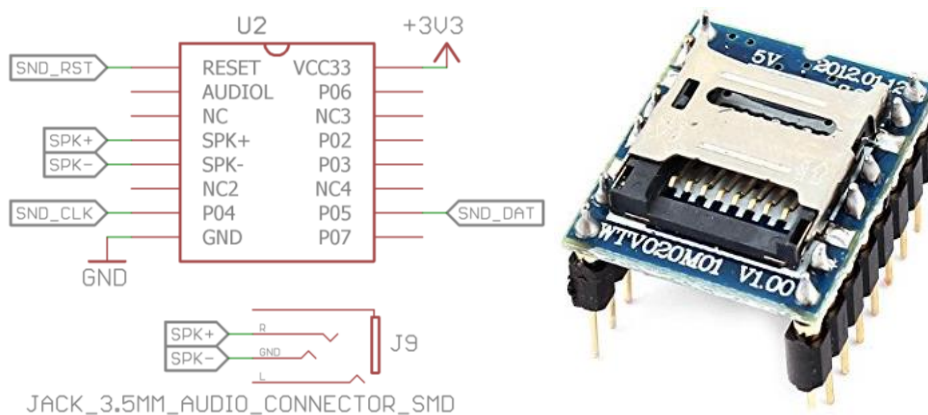
2.4.1 Displej a zvukový modul

Pro poskytování informací o střelbě jsou v kontrolním modulu umístěny displej a zvukový modul. Displej obsahuje 4 sedmisegmentové LED číslice a dvojtečku. Schéma jeho zapojení je na obrázku 42. Zvukový modul je typ WTV-020-SD. Tento modul umožňuje přehrávání zvukových nahrávek ve formátu ad4 z microSD karty. Komunikace mikrokontroléru s tímto modulem je zajištěna přes 3 linky – RESET, CLK a DATA. Není využívána žádná standardní sběrnice, modul využívá vlastní komunikační protokol. Na zvukový modul je připojen standardní 3,5 mm jack konektor a do kontrolního modulu je tak možné připojit sluchátka nebo reproduktory, přes které

bude zvukový modul komentovat střelbu. Aktuálně je na SD kartě 124 zvukových nahrávek. Schéma zapojení a reálná podoba modulu jsou zobrazeny na obrázku 43.



Obrázek 42: Schéma zapojení displeje v kontrolním modulu.

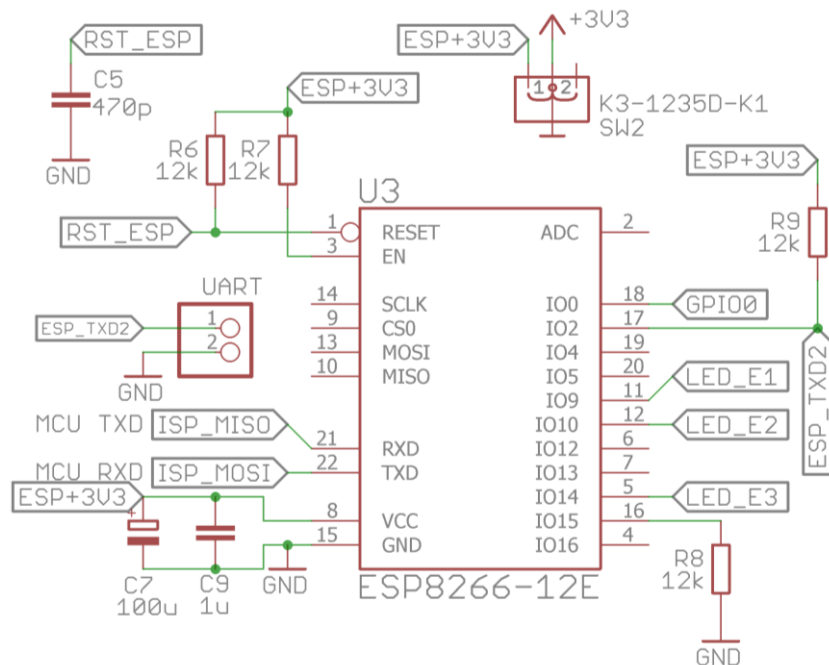


Obrázek 43: Zvukový modul WTV-020-SD (převzato z [28]).

2.4.2 Wi-Fi server

Poslední částí kontrolního modulu je bezdrátový modul ESP8266. Ten dokáže naplno využívat TCP/IP protokol a komunikovat tak s dalšími zařízeními v roli přístupového bodu nebo jako server. V tomto projektu je použit jako Wi-Fi server, který připojeným zařízením poskytuje webovou stránku, přes kterou je možné střelnici ovládat a zobrazovat na ní střelecké výsledky.

ESP8266 je s řídicím mikrokontrolérem propojen skrze sběrnici UART. Firmware modulu je napsán v jazyce microPython, což je obdoba jazyka python uzpůsobená pro jednodušší kontroléry.



Obrázek 44: Schéma zapojení bezdrátového modulu ESP8266.

Takový systém má hlavní výhodu v tom, že není třeba složitě vyvíjet aplikace pro různé platformy. Pomocí tohoto řešení je možné zobrazit střelecké výsledky na počítači, mobilu nebo tabletu po vývoji jednoduché webové stránky v běžném webovém prohlížeči. Nevýhodou je velikost paměti modulu. ESP8266 obsahuje „pouze“ 4 MB paměti FLASH, takže je nutné se vyvarovat návrhu složitější stránky.

Dalším požadavkem bylo, aby byly výsledky ve webové aplikaci zobrazovány v reálném čase. V normálním chodu musí připojená zařízení požádat o aktualizaci dat (například stisknutím tlačítka obnovit v prohlížeči). Zde je použit komunikační protokol WebSocket, který umožňuje odesílání dat ze serveru ke klientům bez této nutnosti.

Webová stránka je vyvíjena ve standardních jazycích HTML, CSS a JavaScript. Pro komunikaci mezi řídicím mikrokontrolérem, serverem a webovou stránkou jsou používány řetězce v JSON formátu, což znamená, že všechny informace posílané dohromady (například údaje o 1 zásahu) jsou naformátovány do 1 řetězce a odeslány zároveň jako 1 paket.

2.5 Komunikace

Jednotlivé moduly spolu při střelbě komunikují. Ze zbraně je třeba do terče nebo kontrolního modulu posílat údaje o tom, že bylo vystřeleno. Terče posílají údaje o zásazích do kontrolního modulu. Mezi těmito moduly probíhá komunikace buď přes bezdrátový modul nRF24L01+ nebo přes systém jednodrát. Kontrolní modul pak komunikuje s okolními zařízeními přes zabudovaný Wi-Fi server. Celý komunikační systém je podrobně popsán v následující kapitole.

Existují 2 možnosti fungování tohoto systému – s kontrolním modulem a bez kontrolního modulu. Pokud je kontrolní modul zapnutý, veškerá komunikace se zbraněmi a terči jde přes něj. Pokud žádný kontrolní modul aktivní není, terče se snaží vyhledat zapnuté zbraně a připojit se k nim přímo. Takto může být připojen vždy 1 terč k 1 zbraně nebo až 20 terčů a 3 zbraně ke kontrolnímu modulu.

Dominantní je v tomto systému kontrolní modul, který do začátku střelby neustále vyhledává nové zbraně a terče. Terč po zapnutí 500 ms čeká, jestli si ho nepřipojí nějaký kontrolní modul a pokud se tak nestane, začne sám vyhledávat volné zbraně. Zbraň vždy čeká, které zařízení si ji připojí.

2.5.1 Protokol jednodrát

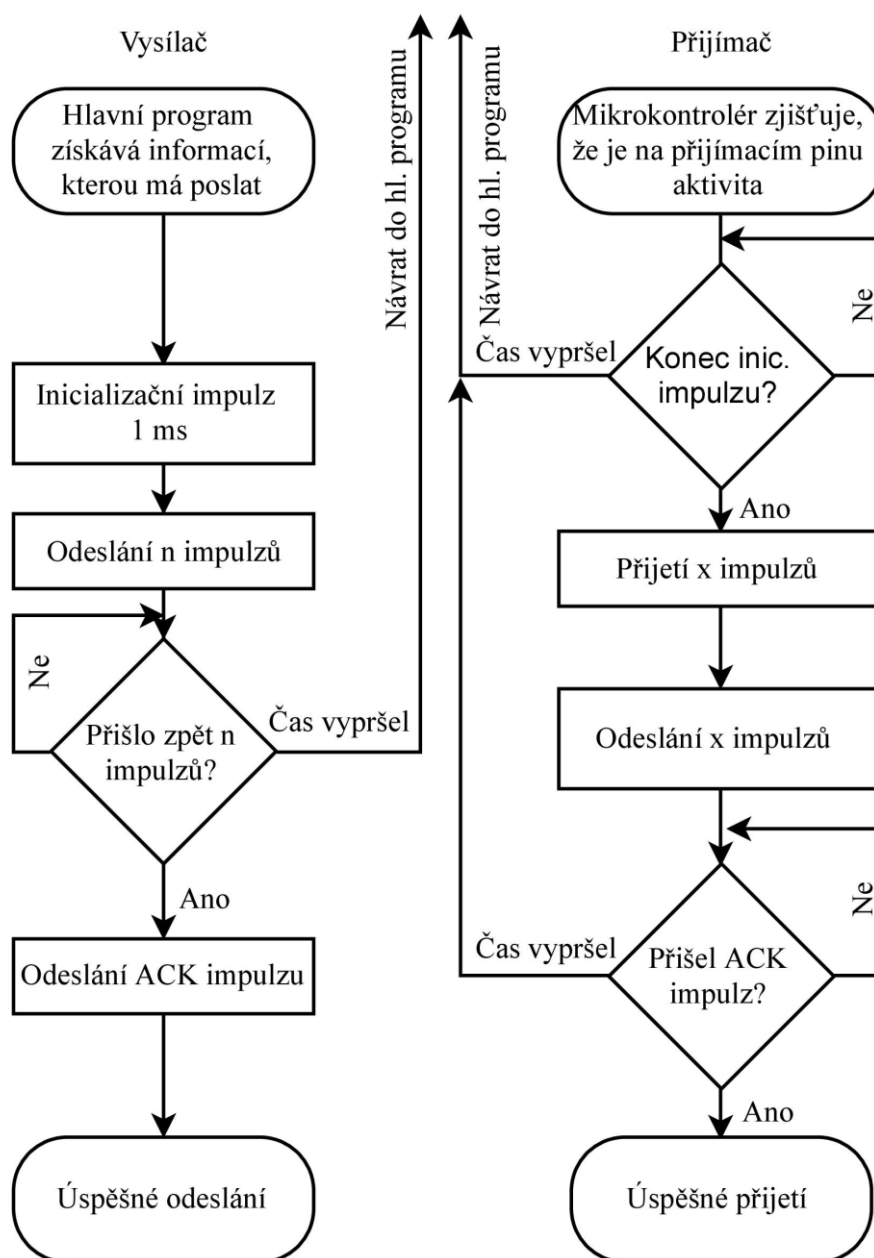
Vzhledem k nedostatku GPIO na mikrokontrolérech byl vytvořen protokol komunikace po jednom vodiči. Tímto způsobem jsou propojeny mikrokontroléry jednoho terče nebo terč s kontrolním modulem přes ethernetový kabel. Celý protokol je řízen čistě softwarově a je možné jej aplikovat na kterýkoliv GPIO mikrokontroléru z rodiny Atmega po zadání operační frekvence díky vytvořené univerzální knihovny jednodratUNI.h.

Protože informace přenášení mezi moduly v tomto projektu jsou jednoduché, protokol je uzpůsoben pro přenos jednoho bajtu. Zvládá rychlost 100 kHz, ale pro větší spolehlivost komunikace je v tomto projektu použita rychlost 10 kHz. Pro úspěšnost komunikace je nutné, aby obě strany komunikace věděly, jestli jsou přijímač nebo vysílač a pokud není komunikace vedena přes pin s podporou externího přerušení, přijímač musí v chodu programu očekávat příchozí data.

Před začátkem komunikace jsou piny na vysílači i přijímači ve stavu vstupní, logická úroveň 0. Stabilitu nízké úrovně zajišťuje externí pull-down rezistor. Ve chvíli, kdy dostane vysílací pin pokyn k odeslání dat, přepne se do výstupního stavu s logickou úrovní 1. Počká v tomto stavu desetinásobek času pro poslání jednotlivých impulsů s informací. Toto je nazváno inicializační impuls a slouží pro uvedení přijímače

do přijímacího stavu. Ten totiž může paralelně vykonávat další úkoly a pouze jednou za čas inicializačního impulsu kontrolovat příchozí data.

Po inicializačním impulsu následuje odeslání předem daného počtu impulsu s frekvencí 10 kHz. Po odeslání všech impulsu se vysílací pin přepíná do stavu vstupní, logická 0 a přijímač stejným způsobem odesílá data zpět do vysílače. Pokud vysílač přijme stejný počet impulsů, jaký odeslal, pošle do přijímače poslední ACK impuls a tím je odeslání dat úspěšné.



Obrázek 45: Komunikace pomocí protokolu jednodrát.

Funkce pro odeslání a přijetí dat také počítají se situacemi, kdy komunikace úspěšná nebude. Všechny stavy jsou chráněny časovači, po jejichž přetečení se mikrokontrolér vrací z odesílací / přijímací funkce a pokračuje dále v programu. Lze také nastavit čas, po který se má daný mikrokontrolér snažit opakovaně vysílat nebo přijímat data.

2.5.2 Komunikace terč – kontrolní modul, jednodrát

Pokud je terč připojen ke kontrolnímu modulu, očekává z něj informaci o tom, který střelecký režim je nastaven. Dokud tuto informaci nezíská, nemůže se na něj střílet. Po každé střele posílá terč do kontrolního modulu údaj čísla zasaženého terče, číslo zasažené LED a počet bodů příslušící zasažené LED. Ve chvíli, kdy kontrolní modul zjistí, že bylo dosaženo maximum střel pro daný střelecký režim, odesílá signál STOP do všech terčů i zbraní. Posledním komunikačním signálem je signál KONTROLA, který přichází po každé střele nebo po 10 s (podle toho, která událost nastane dříve). Tento signál má za úkol zjišťovat, jestli nebyla komunikace přerušena.

Navázání komunikace funguje tak, že kontrolní modul periodicky posílá inicializační signál po všech linkách, které jsou vyvedeny na ethernetové konektory. Pokud dostane na kterékoliv lince odpověď, znamená to, že se na ní připojil terč a kontrolní modul dokončí připojení posláním terči čísla podle toho, kolik terčů má již k sobě kontrolní modul připojených. Terče pak pošle zpět potvrzující signál a pak čeká, než mu kontrolní modul pošle údaj o aktuálně prováděném střeleckém režimu.

Další dění závisí na zvoleném režimu. Po každé střele se do kontrolního modulu odesílají informace o zásahu, ovšem kontrolní modul o ně musí požádat, čímž dává terči informaci o tom, že bylo vystřeleno z některé zbraně a terč tak může případný zásah zobrazit na svém LED poli. V průběhu střelby se neustále kontroluje, jestli je propojení mezi terčem a kontrolním modulem aktivní. Pokud je komunikace přerušena, kontrolní modul resetuje daný terč a pokouší se jej připojit znovu.

2.5.3 Bezdrátová komunikace

K bezdrátové komunikaci mezi všemi moduly jsou použity bezdrátové moduly nRF24L01+. Hardwarově je modul popsán v kapitole 2.2.4. O komunikaci na nízké úrovni se stará samotný bezdrátový modul. Na vyšší úrovni je třeba nastavit několik parametrů a poté pouze posílat data do modulu přes sběrnici SPI.

Pro úspěšný přenos dat mezi dvěma moduly musí mít oba moduly nastavenou stejnou frekvenci (kanál) a vysílací adresa vysílače musí odpovídat přijímací adrese přijímače. Nastavení těchto údajů se provádí odesíláním speciálních sekvencí přes SPI.

Mikrokontroléry jednotlivých modulů tato nastavení provádějí při inicializaci svých bezdrátových modulů a v průběhu programu je dále mění.

Frekvence je nastavitelná v rozsahu 2,400 GHz až 2,525 GHz. Rozlišovací schopnost modulu je 1 MHz nebo 2 MHz v závislosti na rychlosti přenosu dat (250 kb/s až 2 Mb/s). V tomto projektu je nastavena přenosová rychlost na maximální 2 Mb/s, a tedy je možno využít 62 různých kanálů. 1 střelecký systém operuje vždy na 1 kanálu, a pokud by se v blízkosti aktivoval další střelecký systém, automaticky vyhledá další volný kanál a tyto systémy tedy mohou pracovat vedle sebe a navzájem se neovlivňovat.

Tabulka 3: Seznam adres pro bezdrátovou komunikaci v terči a ve zbraňi.

	přijímací pipe	Adresa 5 bajtů				
Zbraň TX						
Tx inicializace terč		C9	C9	C9	C9	A0
Tx inicializace CB		C9	C9	C9	C9	88
Tx CB		C9	C9	C9	C9	A3, A9, AF
Zbraň RX						
Rx CB inicializace	pipe 1	C9	C9	C9	C9	C0
Rx CB přihlášení	pipe 1	C9	C9	C9	C9	CA
Rx CB	pipe 1	C9	C9	C9	C9	C3, C9, CF
Rx terč inicializace	pipe 2	C9	C9	C9	C9	99
Rx terč izolovaná	pipe 2	C9	C9	C9	C9	B1
Rx kalibrace	pipe 3	C9	C9	C9	C9	80
Terč TX						
Tx do CB pro všechny		C9	C9	C9	C9	0
Tx do CB izolovaná		C9	C9	C9	C9	10,14,18,1C, 20...
Tx zbraň inicializace		C9	C9	C9	C9	99
Tx zbraň izolovaná		C9	C9	C9	C9	B1
Terč RX						
Rx inicializace CB/PC	pipe 1	C9	C9	C9	C9	F0
Rx přihlášení CB	pipe 1	C9	C9	C9	C9	FA
Rx CB/PC	pipe 1	C9	C9	C9	C9	43,46,49, 4b, 4e...
Rx zbraň	pipe 2	C9	C9	C9	C9	A0
Rx RESET	pipe 5	C9	C9	C9	C9	69

Přijímací a vysílací adresa je 3 až 5 bajtový údaj. Přijímač může zároveň očekávat přijatá data na 6 různých adresách. Každá z těchto adres je označena jako pipe. Jeden

pipe (pipe 0) je vyhrazen pro odesílání ACK signálů pro potvrzení přijetí dat při vysílání, takže reálně je v modulu 5 volných pipů. Pipe 1 až 5 musí mít stejné první 4 bajty adresy. Pátý bajt rozhoduje o přiřazení ke správnému pipu. Vhodným přepínáním adres lze docílit i sítě o více zařízeních. V tomto projektu se přijímací a vysílací adresy nastaví při úspěšném připojení 2 modulů v závislosti na typu modulu a počtu již připojených zařízení.

V tabulce 3 jsou vypsány použité adresy pro jednotlivé komunikace mezi moduly. Pro jednoduchost jsou vypsány pouze adresy bezdrátových modulu v terči a zbraní. Adresy jsou psány v číslech šestnáctkové soustavy. Přijímací adresy jsou označeny jako Rx, vysílací Tx (podle anglických slov receiver a transmitter). Pokud jsou u jednoho zařízení uvedeny 2 nebo více adres pro jeden přijímací pipe, znamená to, že mezi těmito adresami se přepíná v průběhu programu. Stejně tak pokud je u jedné adresy více posledních bajtů, přepíná se mezi nimi v průběhu programů.

Dále je možné nastavit počet opakovaných posláních při neúspěšném odeslání, časová prodleva mezi nimi, vysílací výkon a velikost payloadu. Payload je soubor bajtů odeslaných v jednom paketu. Maximální velikost je 32 B.

Vysílač pak přetransformuje přijatá data z mikrokontroléru do odpovídajících paketů a data odešle. 1 paket obsahuje 1 bajt preamble, 3 až 5 bajtů adresy, 1 až 32 bajtů payloadu a 1 nebo 2 kontrolní CRC bajty [23].

Preamble 1 B	Adresa 3 - 5 B	Payload 1 - 32 B	CRC 1 - 2 B
--------------	----------------	------------------	-------------

Obrázek 46: Formát paketu při bezdrátové komunikaci (převzato z [23])

Přijímač musí neustále demodulovat přijaté signály a zjišťovat, jestli některý z nich neobsahuje paket se správnou adresou, očekávaným počtem bajtů payloadu a správným údajem CRC. Pokud takový paket objeví, odesílá data z payloadu do mikrokontroléru přes SPI.

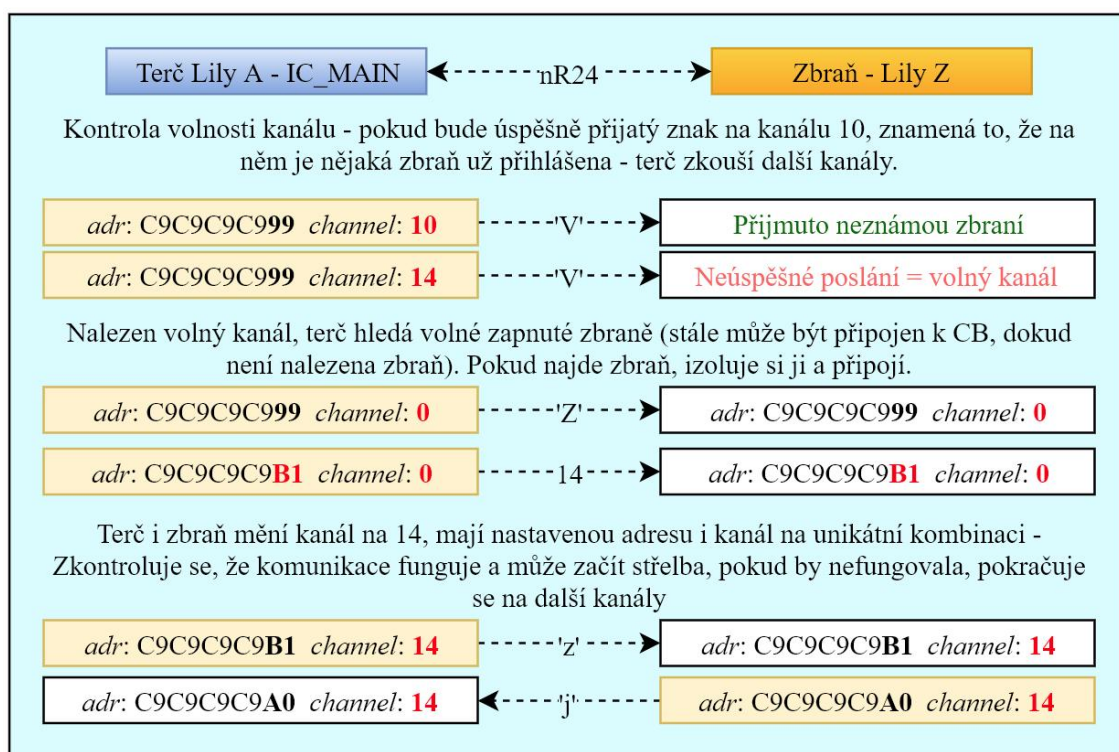
2.5.4 Komunikace terč – zbraň

Komunikace mezi terčem a zbraní probíhá vždy bezdrátově přes modul nRF24L01+. Zapnutý terč nejdříve 500 ms čeká na případné připojení ke kontrolnímu modulu. Pokud se tak nestane, sám vyhledá volný kanál, na kterém ještě není připojená žádná zbraň. Vyhledávání začíná vždy na kanálu 10 (2,410 GHz). Odešle znak V na adresu zbraně ve stavu připojení (0xC9, 0xC9, 0xC9, 0xC9, 0x99). Pokud bezdrátový modul terče přijme ACK signál, znamená to, že na daném kanálu a adrese již je nějaká aktivní zbraň a přesouvá se na kanál o 4 vyšší než předchozí. Toto provádí do doby, než najde volný kanál.

Poté se přepíná na kanál 0 (2,400 GHz), kde periodicky odesílá znak Z na stejnou adresu. Ve chvíli, kdy se zapne nová zbraň, údaj přijme, terč získá ACK signál a začíná připojování. Terč přepne svou vysílací adresu na 0xC9, 0xC9, 0xC9, 0xC9, 0xB1. Stejnou adresu nastaví zbraň jako svou přijímací. Tímto se oba moduly dostanou na „izolovanou“ komunikaci a připojovací proces nemůže být narušen jinými moduly.

Terč odesílá komunikační kanál, který označil jako volný na začátku procesu. Oba moduly se přesouvají na tento volný kanál. Terč posílá kontrolní znak a zbraň odešle zpět druhý kontrolní znak na adrese určené pro tento směr komunikace (0xC9, 0xC9, 0xC9, 0xC9, 0xA0). Po úspěšném přijetí všech těchto signálů je ověřena schopnost obousměrné komunikace a přihlášení je kompletní.

Celá přihlašovací sekvence je popsána na obrázku 47. Každý jeden odesílaný údaj je na zvláštním řádku. Žlutým rámečkem je označen vysílač, bílým přijímač. Každá odeslaná informace je doprovázena informací o frekvenčním kanálu a adrese (Ve vysílači se jedná o vysílací a v přijímači o přijímací adresu). Symbol uprostřed šipky s čárkovanou čarou je aktuálně odesílaná informace.

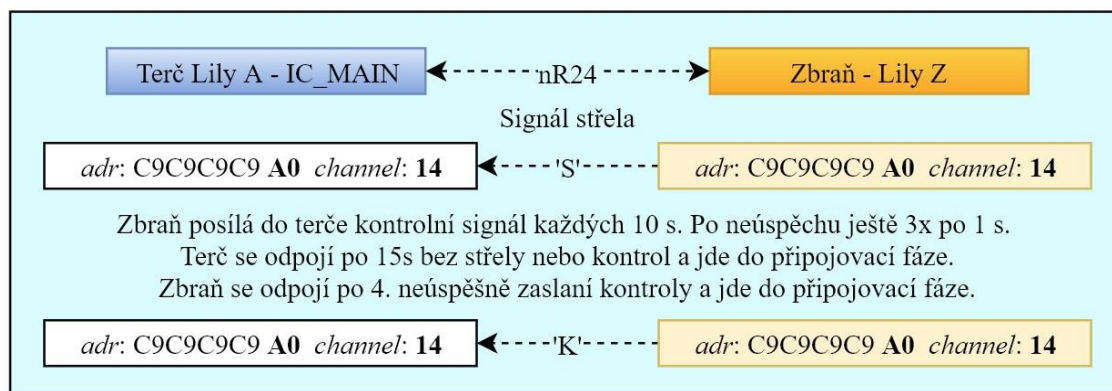


Obrázek 47: Přihlašovací sekvence pro komunikaci terč – zbraň.

Při každém výstřelu zbraň svítí s laserovou diodou na 5 ms. Po dalších 5 ms vysílá doprovodný bezdrátový signál, který dává terči informaci o to, že bylo opravdu vystřeleno z této zbraně. Až poté může terč zobrazit trefenou LED. Pokud tedy některá

LED bude vybita jiným laserem nebo silným okolním světlem, nezaznamená se to jako výstřel a střelec prakticky nic nepozná.

Po každých 10 sekundách bez střely posílá zbraň symbol kontroly připojení. Pokud terč nepotvrdí příjem, pošle stejný údaj ještě 3 krát vždy po 1 sekundě. Pokud terč nepotvrdí příjem kteréhokoliv ze 4 posláních, modul do zbraně se resetuje. Stejně tak terč, pokud do 15 sekund nedostane kontrolní informaci ze zbraně, resetuje se.



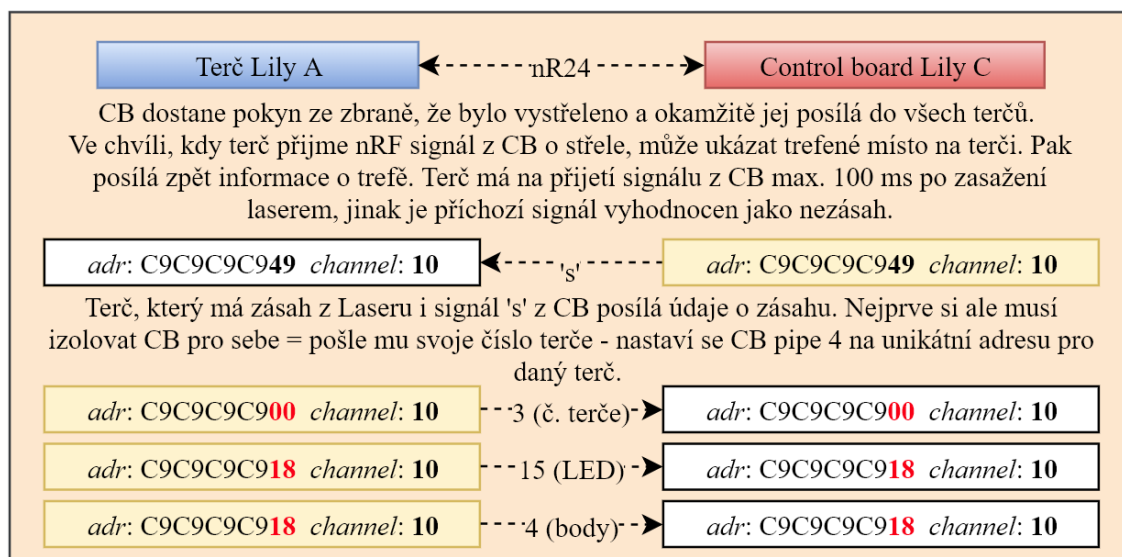
Obrázek 48: Formát komunikace při výstřelu a kontrole připojení.

Žádná další komunikace mezi zbraní a terčem není potřeba, a kvůli udržení co největší jednoduchosti a rychlosti odesílání jsou tato veškerá posílaná data.

2.5.5 Komunikace kontrolní modul – zbraň

Pokud je aktivní kontrolní modul, nově zapnuté zbraně se budou připojovat ke kontrolnímu modulu a ne k terči. Přihlašovací proces probíhá podobným mechanismem jako u komunikace mezi zbraní a terčem (viz kapitola 2.5.4). Komunikace probíhá na jiných adresách a při přihlašování posílá kontrolní modul kromě volného kanálu ještě údaj o tom, kolikátá zbraň je právě připojovaná. Takto lze připojit až 3 zbraně, ze kterých lze pak najednou střílet na více terčů. Podrobnosti o přihlašovacím procesu jsou zobrazeny na obrázku 49.

Aby terč zobrazil přicházející výstřel na svém snímacím poli, musí nejprve dostat signál o střele, takže kontrolní modul posílá signál o výstřelu ze zbraně hned, jak jej přijme ze zbraňového modulu do všech terčů. Pokud byl terč zasažen laserem, odpoví kontrolnímu modulu posláním údajů o střelbě – číslo zasaženého terče, číslo zasažené LED, počet bodu odpovídajících zasažené LED.



Obrázek 50: Část komunikace mezi terčem a kontrolní modulem.

Různé střelecké režimy mají různý počet střel. Kontrolní modul je jediný, který má informaci o aktuálním počtu vystřelených ran, proto na konci střeleckého režimu ještě posílá do všech terčů signál STOP a terče tak ukáží všechna svá zasažená místa. Po další střele kontrolní modul resetuje všechny terče, čímž končí aktuální střelecké kolo a začíná další.

2.6 Průběh střelby, střelecké režimy.

Jak již bylo zmíněno, existují 2 základní konfigurace, jak moduly propojit. Jednoduchý základní set obsahuje pouze zbraň, zbraňový modul a modul terče (viz obrázek 51). Pro tento set existuje pouze 1 střelecký režim. V tomto režimu má střelec vždy 10 střel v jednom kole. Po přihlášení zbraně terč zabliká s vnějším prstencem, pak trvale rozsvítí prostřední LED a všechny LED krajního prstence a poté střelec střílí. Pokud se trefí do terče, terč na 500 ms zobrazuje trefenou LED jejím rozsvícením. V tu chvíli je zhasnutý krajní prstenec i středová LED. Po střele, která nezasáhla terč, terč na 100 ms vypíná všechno svícení.

Po desáté střele a jejím zobrazení terč přejde do stavu, kdy ukazuje všechny zasažené LED v tomto střeleckém kole. Ukazuje je do chvíle, kdy střelec vystřelí jedenáctou střelou. Ta resetuje terč to původního stavu a střelec má opět 10 střel.



Obrázek 51: Jednoduchý set zbraň – zbraňový modul – terč.

Při použití kontrolního modulu získává střelec širokou paletu střeleckých režimů. Aktuálně je nakonfigurováno 7 základních režimů, jejichž modifikacemi může střelec získat 127 způsobů, jak střelbu provádět.

Prvním režimem je normální režim, kdy střelec má omezený počet střel a snaží se trefit všechny rány co nejblíže středu, za což dostane nejvíce bodů. Režim rychlopalba je obdobou normálního režimu. Změna je v tom, že střelec má omezený čas na určitý počet střel a pokud nestihne své střely vystřelit, propadají.

Režim zmenšující se terč je rozdělen na 4 kola, kdy v každém kole střelec střílí na menší terč než v kole předchozím. Režim moderní pětiboj je simulací střelby v tomto sportovním odvětví, kdy střelec má za úkol trefit terč 5 krát bez ohledu na to, kam terč trefí nebo kolik ran na to použije. Porovnávacím kritériem je zde čas. Režim points je obdobou nejznámějšího herního módu pro šipky. Střelec střílí do té doby, než přesáhne předem daný počet bodů. Tento režim je atraktivnější verzí normálního režimu pro případ více hráčů.

Režim biatlon je opět simulací sportovní střelby. Střelec zde má za úkol trefit daný počet terčů, ale na každý má pouze 1 ránu. Pokud se netrefí, dostává penalizaci. Posledním základním režimem je postřeh. Střelec čeká, než se rozsvítí jeden z terčů a pak se jej snaží jednou ranou trefit. Měří se čas jeho reakce. Pokud se netrefí, získává penalizaci 3 s. Dva poslední režimy jsou zpřístupněny až po připojení minimálně 3 terčů ke kontrolnímu modulu, protože s menším počtem by nedávaly smysl.

Každý z těchto režimů má další možnosti nastavení jako například počet střel, počet bodů při zásahu do středu, závodní nebo tréninkový režim, typ závodního režimu a speciální formy pro 1, 3 a 5 terčů. Většinu režimů je také možné hrát ve verzi pro více hráčů. V tabulce 4 jsou vypsané režimy a jejich nastavené a nastavitelné konstanty.

Tabulka 4: Střelecké režimy a jejich nastavení.

Název režimu	Typ režimu	Body nebo zásahy	Čas střely	Čas kola [s]	Rekord	Režimy terče	Volba 1 (počet střel, bodů, typ závodu)	Volba 2 (střed, závod)	Střely jednoho kola
Normální 1	N	B	0	0	body	1	3,6,12,24, 5, 10	Střed	3 / 5
Rychlopalba 1	R	B	0	10	body	1	5, 10, 15, 20	Střed	5
Zmenšující 1	Z	B	0	0	body	1, 2, 3, 4	12	Střed	3
Mod. pětiboj 1	M	Z	0	0	čas	5	5, 10, 15, 20	závod	5
Body 1	Bo	B	0	0	střely	1	50, 100	Střed	3
Normální 3	N	B	0	0	body	9	3,6,9,12,15,18,24	Střed	3
Rychlopalba 3	R	B	0	5	body	9	3,6,9,12,15,18,24	Střed	3
Zmenšující 3	Z	B	0	0	body	9,10,11,12	12	Střed	3
Body 3	Bo	B	0	0	střely	9	50, 100	Střed	3
Malý biatlon	Bi	Z	0	0	čas	6 / 7	L, S, LS, LSLS	závod	3
Postřeh 3	P	Z	3	0	čas	8	3,6,9,12,15,18,24	x	3
Normální 5	N	B	0	0	body	9	5, 10, 15, 20	Střed	5
Rychlopalba 5	R	B	0	10	body	9	5, 10, 15, 20	Střed	5
Zmenšující 5	Z	B	0	0	body	9,10,11,12	20	Střed	5
Postřeh 5	P	Z	0	0	čas	8	5, 10, 15, 20	x	3
Mod. pětiboj 5	M	Z	3	0	čas	5	5, 10, 15, 20	závod	5
Velký biatlon	B	Z	0	0	čas	6 / 7	L, S, LS, LSLS	závod	5

Volba režimu probíhá pomocí tlačítek v kontrolním modulu. Uživatel nejprve zvolí číslo režimu od 1 do 17 (koresponduje s pořadím režimu v tabulce 17). Režimy 6 až 12 jsou dostupné až po připojení 3 terčů, režimy 13 až 17 jsou zpřístupněné až po připojení

5 a více terčů. Volbou čísla režimu se automaticky určí další střelecké parametry (vyznačené žlutě v tabulce 17). Parametr body nebo zásahy určuje, jestli se počítají body za zásah blíže středu nebo je důležité pouze terč zasáhnout. Čas střely je maximální čas pro jednu střelu, který se používá v postřehových režimech. Čas kola je zase maximální čas pro vystřelení celé střelecké sady pro režimy rychlopalby. Parametr rekord říká, jestli je pro určení vítěze potřeba rekord režimu směřovatný počet nastřelených bodů, čas střelby nebo počet střel.

Poté následuje volba postupně 2 parametrů opět pomocí tlačítek a přiřazení dalších parametrů v závislosti na těchto volbách. Nakonec uživatel volí počet hráčů. Tímto je určen střelecký režim přesné a kontrolní modul posílá všem terčům informaci o nastaveném režimu. Odesílá se ve formě čísla režimu, ale tentokrát to není číslo odpovídající tabulce 17. Terče mají své vlastní režimy a jejich parametry a kontrolní modul pouze spouští tyto režimy v pořadí odpovídající jeho střeleckým režimům.

Tabulka 5: Střelecké režimy pro terče.

Název režimu	Svítilí prstenec	Zhasíná	Střed svítí	Postřeh
1. Normální 1	1	ne	ano	ne
2. Normální 2	2	ne	ano	ne
3. Normální 3	3	ne	ano	ne
4. Normální 4	4	ne	ano	ne
5. Moderní pětiboj	1	ne	ne	ne
6. Biatlon stojka	1	ano	ne	ne
7. Biatlon ležka	4	ano	ne	ne
8. Postřeh	1	ano	ano	ano
9. Zmenšující 1	1	ano	ano	ne
10. Zmenšující 2	2	ano	ano	ne
11. Zmenšující 3	3	ano	ano	ne
12. Zmenšující 4	4	ano	ano	ne
13. Bez kontrolního modulu	1	ne	ano	ne

Svítilí prstenec je parametr, který určuje, který prstenec na terčích při střelbě svítí (1 znamená, že je rozsvícený krajní prstenec). Parametr „zhasíná“ určuje, jestli po zásahu terč zhasne, což je vhodné pro režimy s více terči, kdy je nutné zasahovat postupně všechny terče. „Střed svítí“ určuje, jestli je středová dioda rozsvícena při střelbě a parametr postřeh ovládá postřehový režim, kdy je terč zhasnutý až do pokynu z kontrolního modulu.

Pokud je tedy v kontrolním modulu například aktivní režim zmenšující se terč při 3 zapojených terčích, kontrolní modul aktivuje v terčích režim 9, v němž se provede 1 střelecké kolo, kontrolní modul resetuje terče a aktivuje terčový režim 10. Takto je tedy schopen zmenšovat prstence terče postupným spouštěním terčových režimů 9 až 12.

Kontrolní modul v průběhu voleb režimu i v průběhu střelby tyto akce odpovídajícím způsobem komentuje skrz zvukový modul a zobrazuje informace na displeji. Informace dále posílá na webový server, takže střelci mohou výsledky vidět ve svém chytrém zařízení jako telefon nebo počítač. Skrze tuto aplikaci je možné kontrolní modul a tedy celou střelbu ovládat.

2.7 Měření proudového odběru

Vzhledem k tomu, že se jedná o zařízení, které může pracovat kompletně na baterie či akumulátory, je třeba snížit jeho spotřebu na minimum. K tomu byla v průběhu vývoje prováděna měření proudového odběru všech modulů a patřičně upraven návrh.

2.7.1 Zbraňový modul

U tohoto modulu je snížení spotřeby nejkritičtější, protože je vždy napájen z akumulátoru. Největšími odběrateli proudu tohoto modulu jsou laserová dioda a bezdrátový modul nRF24L01+. V datovém listu bezdrátového modulu je uvedeno, že jeho proudový odběr je 11,3 mA při odesílání dat a 13,5 mA ve stavu připraveném na příchozí data. Dále je možné modul uvést do 2 standby režimů, ve kterých má proudový odběr pouze 320 μ A respektive 26 μ A.

Modul je tedy nastaven tak, že po přihlášení zbraně už modul žádá data nepřijímá a může je pouze vysílat, tedy přepíná mezi vysílacím režimem (ve kterém zůstává na krátké časy do 20 ms) a standby režimem.

Laserová dioda je nastavena tak, že její proudový odběr je od 75 mA do 85 mA. Pro výdrž akumulátoru je tedy nejlepší omezit čas, kdy laserová dioda svítí na minimum. Následující tabulka 6 ukazuje naměřené hodnoty proudového odběru z akumulátoru v různých stavech. Měření proběhlo na 5 různých sestavených modulech. K měření byl vytvořen speciální program, který každý stav držel 15 s. Hodnoty byly vyčteny až po ustálení.

Tabulka 6: Proudový odběr v různých stavech zbraňového modulu.

Stav	I [mA]		
	min.	max.	průměr
Fáze přihlašování	19,7	21,2	20,4
Fáze přihlašování + svítící LED	20,4	21,9	20,9
Stav připojeno, čeká na výstřel	6,2	6,9	6,5
Odesílání údajů přes nRF24	16,9	18,4	17,3
Výstřel (laser svítí)	80,8	91,0	84,1

Pro výpočet výdrže akumulátoru byly použity empiricky zjištěné hodnoty trvání jednotlivých stavů. Pro fázi přihlašování byl stanoven čas 1 s, pro výstřely a tedy i odesílání dat byly stanoveny časy 10 ms jedenkrát za 1 s. Pro 5 minutovou střelbu je výpočet průměrného proudového odběru následující:

$$I_p = \frac{20,4 * 1 + 299 * (6,5 * 0,998 + (17,3 + 84,1) * 0,001)}{300} = 6,63 \text{ mA}, \quad (7)$$

kde I_p je průměrný proudový odběr modulu. Akumulátor má udávanou kapacitu 100 mAh. Reálně byla kapacita změřena na 95 mAh. Pro výdrž akumulátoru na 1 nabití tedy platí:

$$t_p = \frac{C}{I_p} = \frac{95}{6,63} = 14,3 \text{ hod}, \quad (8)$$

kde C je kapacita akumulátor, I_p je průměrný proudový odběr a t_p je doba vybití akumulátoru. Modul by tedy měl fungovat na jedno nabití přibližně 14 hodin.

2.7.2 Modul terče

V modulu terče byly také změřeny proudy ze zdroje v důležitých stavech na 3 různých terčích. Výsledky jsou vidět v tabulce 7.

Tabulka 7: Proudový odběr v různých stavech modulu terče.

Stav	I [mA]		
	min.	max.	průměr
Všechny LED svítí	73,2	81,1	75,1
Přihlašování	37,1	39,5	38,1
Přihlášeno, svítí prstenec	58,7	63,2	60,7

Zvýšený proudový odběr je způsoben několika faktory. Mikrokontroléry Atmega128A by měly podle datového listu odebírat v aktivním režimu při napájení

3,3 V asi 8 mA. Dále je zde opět bezdrátový modul nRF24L01+, který tentokrát nemůže být uváděn do standby režimu, ale naopak musí i při střelbě neustále snímat příchozí data. Snímací pole LED má v této konfiguraci trvalý odběr až 40 mA. V normálním chodu ale nikdy nesvítí všechny LED a navíc trvale, takže tato hodnota je velmi proměnlivá. Zbylý proud spotřebovává lineární regulátor AMS1117, jehož účinnost převodu vstupního proudu na výstupní byla změřena v rozmezí 70 až 90 %.

Analogickým výpočtem jako u modulu do zbraně bylo vypočítáno, že modul teče bude fungovat se 4 akumulátory AAA s kapacitou 900 mAh opět přibližně 14 hodin.

2.7.3 Kontrolní modul

Kontrolní modul byl kompletně sestaven pouze 1, takže měření probíhala pouze na tomto prototypu. V kontrolním modulu je již více významných odběratelů proudu, proto byl každý změřen zvlášť. V modulu byly inicializovány všechny periferie, poté byly všechny uvedeny do stavu, kdy nepřispívají proudovému odběru (různé spánkové režimy nebo vypnutí) a jedna po druhé byly měřeny různé aktivní stavy těchto periférií. Odečtením klidové hodnoty při žádné aktivní periférii od naměřených hodnot pro jednotlivé události byly získány přibližné hodnoty proudových odběrů jednotlivých periférií. V tabulce 8 jsou tyto hodnoty v pravém sloupci (označeno jako veličina I_2).

Jednotlivé události na sobě nejsou ve většině případů nijak závislé, proto se klidně může stát, že by v jednu chvíli byly aktivní všechny periferie, což by mohlo způsobit proudový odběr až 250 mA, který by mohl trvat i několik sekund v kuse. Při namáhání modulu byly naměřeny krátkodobé vrcholové hodnoty přes 400 mA. Hlavním zdrojem těchto proudových požadavků je Wi-Fi modul ESP8266.

Tabulka 8: Proudový odběr různých stavů v kontrolním modulu.

Stav	I [mA]	I_2 [mA]
Po inicializaci	8,4	
6 LED svítí	18,2	9,8
Displej svítí (HELO)	24,8	16,4
Displej svítí (8888)	33,3	24,9
Zvukový modul aktivní	74,5	66,1
ESP aktivní server	91,5	83,1
ESP vysílá data přes Wi-Fi	130,8	122,4
nRF vysílá data	19,6	11,2
nRF přijímá data	21,1	12,7

Minimální doba výdrže akumulátorů s kapacitou 900 mAh se tedy pohybuje okolo 3 hodin, což je stále dostačující pro většinu případů použití.

2.8 Zařízení na trhu

Paralelně s elektronickým vývojem probíhala k tomuto projektu i část byznysová. Již při návrhu byly zohledňovány připomínky prvních testerů a zákazníků tak, aby bylo výsledné zařízení co nejvíce konkurenceschopné. Jedním ze stěžejních parametrů konkurenceschopnosti je cena zařízení, proto jsou zde ještě v tabulce uvedeny výsledky kalkulace výrobních nákladů pro všechny moduly a jejich kombinace při výrobě 10 a 1000 kusů. V pravém sloupci tabulky jsou očekávané odpovídající prodejní ceny těchto modulů či setů.

V kalkulaci výrobních nákladů jsou započítány náklady na pořízení všech potřebných součástek, DPS, krabiček a dalších materiálů, náklady na osazení DPS, kompletaci zařízení a zabalení produktu do komerčního obalu. Jednorázové náklady jako zadání výroby pro osazovací automat nebo nákup formy na injekční vstřikování plastů jsou ekvivalentně rozpočítány mezi všechny kusy.

Zbraně, které budou patrně dodávány s elektronickými moduly, jako jeden kompletní set nejsou vyráběny, ale pouze nakupovány, proto jsou jako jejich výrobní náklady započítány jejich prodejní ceny.

Tabulka 9: Výrobní náklady a prodejní ceny za kus při výrobě 10 a 1000 kusů

Výrobní náklady a prodejní ceny za kus při výrobě 10 a 1000 kusů	10 kusů		1000 kusů	
	výroba	prodej	výroba	prodej
	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
Modul terče.	768	2000	418	1500
Modul do zbraně.	569	1500	389	1000
Kontrolní modul.	695	2000	402	1500
Manuální airsoft pistole.	500	500	500	500
Elektrická airsoft pistole.	1500	1500	1500	1500
Manuální airsoft puška.	2500	2500	2500	2500
Terč, modul do zbraně, manuální airsoft pistole.	1837	4000	1307	3000
3 terče, modul do zbraně, elektrická airsoft pistole, kontrolní modul.	5068	11000	3545	8500
5 terčů, modul do zbraně, manuální airsoft puška, kontrolní modul.	7604	16000	5381	12500

Z kalkulace vyplývá, že nejjednodušší set s jedním terčem a jednou zbraní vhodný pro běžné domácnosti bude možné pravděpodobně nakoupit za 2999 Kč a velký set obsahující 5 terčů, dlouhou zbraň a kontrolní modul určený pro hotely, hospody a kluby bude stát minimálně 12500 Kč. S takovými údaji lze vstoupit na několik různých trhů současně.



Obrázek 52: Výsledná podoba jednoho z možných prodejních setů.

3 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout kompletní zařízení pro simulaci sportovní střelby pomocí laserových technologií. Po úvodní rešerši byl tedy zvolen vhodný způsob snímání laserových paprsků založen na principu katodového snímání LED. Na tomto principu je vytvořen návrh modulu terče. Ten je proveden tak, aby byly terče lehce přenositelné, spolehlivé a byly schopné fungovat a komunikovat bezdrátově. Terč je schopen zkalibrovat své snímací schopnosti podle okolního světla a je tak schopen snímat i při okolním záření o intenzitě přes 20 000 lx, což je velká konkurenční výhoda neboť to umožňuje střelcům střílet ve venkovních prostorech. Velikost navrženého terče odpovídá velikosti terčů používaných pro profesionální sportovní střelbu.

Modul do zbraně byl navržen tak, aby fungoval s různými zbraněmi a bez fyzického zásahu do samotné zbraně. Snímací proces výstřelů je založen na čtení a zpracování dat z elektretového mikrofону pomocí analogově – digitálního převodníku mikrokontroléru. Inteligentní systém softwarové kalibrace umožňuje rozeznávat výstřely z různých zbraní se spolehlivostí blížíící se 100%.

Kontrolní modul je schopen propojit několik zbraní a terčů do jednoho střeleckého systému a tyto 3 moduly tedy společně tvoří kompletní sadu zařízení pro simulaci sportovní střelby. Bezdrátovou komunikaci obstarává v celém projektu modul nRF24L01+. Kontrolní modul může poskytovat informace o střelbě ve formě zvukových komentářů, zobrazování údajů na displeji nebo ve webové aplikaci, ke které se lze připojit z libovolného zařízení s webovým prohlížečem.

Všechny 3 moduly byly kompletně navrženy jak hardwarově, tak softwarově. Bylo také provedeno testování spolehlivosti komunikace, vzdálenosti střelby, délky vybití akumulátorů v jednotlivých modulech, odolnost terčů na okolní osvětlení a další.

Výsledkem práce je tedy kompletní zařízení pro simulaci sportovní střelby, které je svými parametry více než konkurenceschopné. V mnoha ohledech předhání závodní terče pro profesionální soutěže a nabízí vysokou atraktivitu střelby. Jako takové má velký potenciál prorazit na trhu se střeleckými pomůckami či zábavní elektronikou obecně.

LITERÁRNÍ ZDROJE

- [1] Webová stránky společnosti Laserlyte. *Laserlyte - Laser Training Systems, Laser Guns Sights* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.laserlyte.com/>.
- [2] Webová stránky společnosti Laser Ammo. *Laser Ammo Europe* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <http://www.laser-ammo.se/>.
- [3] Webová stránky společnosti HoRa Systemtechnik GmbH. *Hora 2000* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <http://www.hora2000.de/>.
- [4] Webová stránky společnosti Apeom. *Apeom - laser guns and equipment* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <http://www.apeom.cz/>.
- [5] Webová stránky projektu iTarget. *ITarget pro (Laser Firearm Training System)* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.itargetpro.com/>.
- [6] Laser Classification. *WAVRICK Health & Safety Department* [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://goo.gl/diFDoH>.
- [7] Laser safety. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety#/media/File:Laser_class_EN_60825-1.en.png
- [8] IEC 60825-1. *Safety of laser products: Equipment classification and requirements*. 3. Ženeva, Švýcarsko, 2014.
- [9] URBAN, František a Břetislav MIKEL. *Optoelektronika* [online]. 2011 [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: <https://goo.gl/em4qUx>. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] *Fotodioda* [online]. [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <https://goo.gl/gwus8o>.
- [11] Fotodioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/qU5Yhk>.
- [12] Fotocitlivé prvky. *Státnice z elektroniky* [online]. [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <https://goo.gl/4LJoLb>.
- [13] Convex lens. In: *Filestack* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/WJtwxj>
- [14] Image sensor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://goo.gl/knVayL>.
- [15] Bayer filter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://goo.gl/dGYv2V>
- [16] Spektrum. In: *Labo* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/XuB2VW>
- [17] Foveon X3. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://goo.gl/EXB28Y>.
- [18] DIETZ, Paul, William YERAZUNIS a Darren LEIGHT. Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs. *Mitsubishi Electric Research*

- Laboratories* [online]. Cambridge, Massachusetts, USA, 2003, 19 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://goo.gl/2nDFTo>.
- [19] POLOCH, Martin. *Laserová zbraň a terč pro trénink sportovní střelby* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://goo.gl/tzysYW>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Martin Friedl, Ph.D.
- [20] ATMEL CORPORATION. *ATmega128A: DATASHEET COMPLETE* [online]. Rev. 8151J – 07/2015. San Jose, CA 95110 USA, 2015 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/M7f9H6>.
- [21] Atmega128A. In: *Cloudinary* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/inxFHZ>.
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. *LM2596: SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator* [online]. Dallas, Texas, USA, 2016 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/NfpXSd>.
- [23] NRF24L01+. In: *Robotop* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/kK8xEP>.
- [24] USBASP. In: *Protostack* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/VJHVGL>.
- [25] Vibration sensors. In: *Andicelabs* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/88bkEM>.
- [26] Mikrofon: Elektretový mikrofon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <https://goo.gl/Kns32C>.
- [27] Cheerson CX-10 battery. In: *Banggood* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/tXtP46>.
- [28] Zvukový modul WTV-020-SD. *Amazon* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: goo.gl/rjHafU.

SEZNAM PŘÍLOH

A	Měření	89
A.1	Měření dob vybíjení různých LED	89
B	Návrhy desek plošných spojů	90
B.1	DPS modul terče, horní strana	90
B.2	DPS modul terče, spodní strana	91
B.3	DPS modul zbraně, horní strana	92
B.4	DPS modul zbraně, spodní strana	92
B.5	DPS kontrolní modul, horní strana	93
B.6	DPS kontrolní modul, spodní strana	94
C	Seznamy součástek	95
C.1	Modul terče	95
C.2	Modul do zbraně	96
C.3	Kontrolní modul.....	97
D	Fotografie osazených DPS	98
D.1	DPS terče, přední strana.....	98
D.2	DPS zbraně, přední a zadní strana	99
D.3	DPS kontrolního modulu, přední strana	100
E	Měření zvukových vln	101
E.1	Výstřely z manuální zbraně	101
E.2	Výstřely z elektrické zbraně	102
E.3	Nežádoucí jevy	103

A MĚŘENÍ

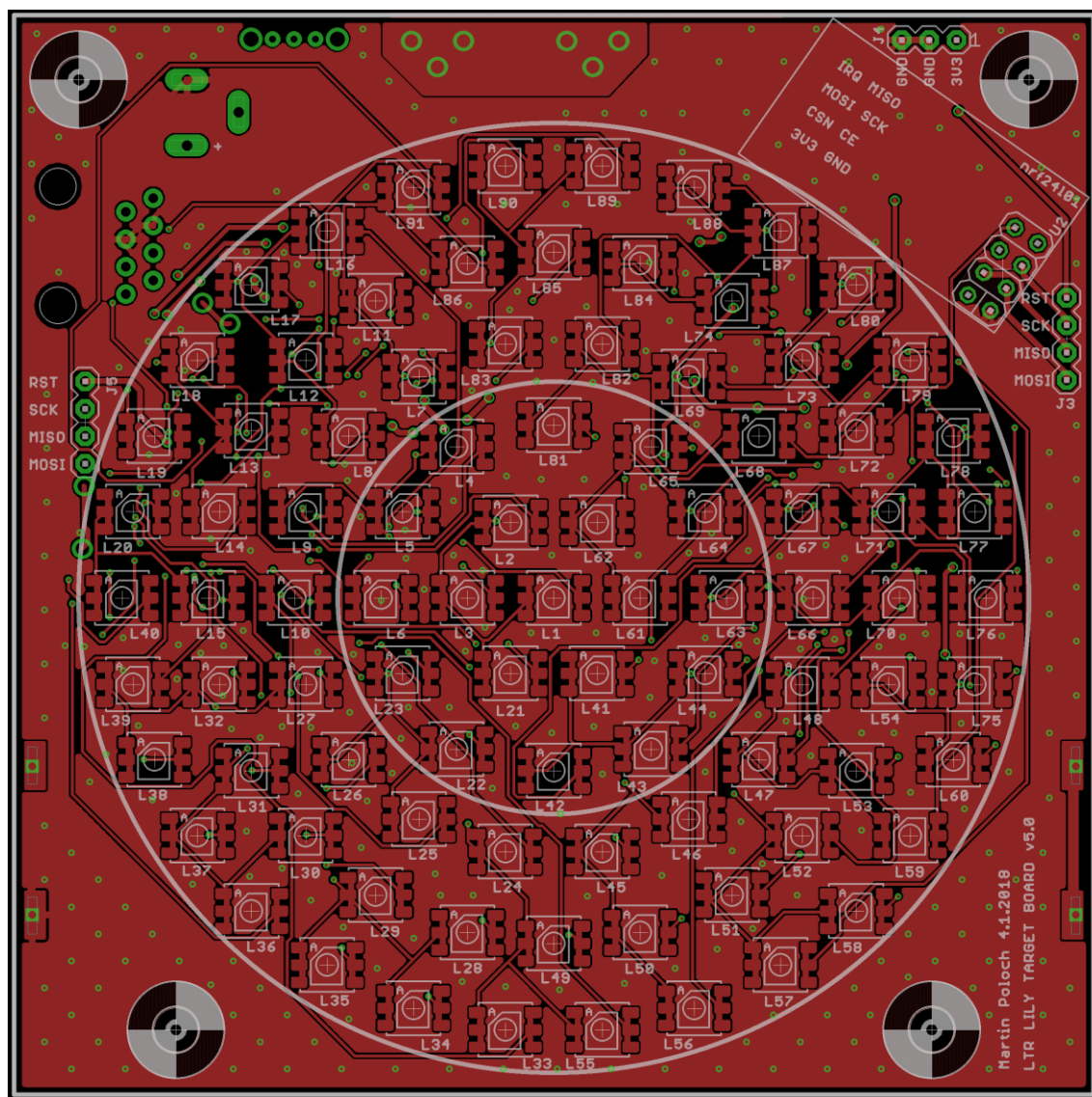
A.1 Měření dob vybíjení různých LED

Číslo	Typ pouzdra	Vyzařovací úhel	Vlnová délka	Svítivost	Doba vybití LED								
		α	λ		Modrý laser (405 nm)		Zelený laser (532 nm)		Červený laser (650 nm)		Lampa 1	Lampa 2	Tma
		(°)	(nm)		přímo	dotek	přímo	dotek	přímo	dotek	4000 lux	300 lux	< 10 lux
		(°)	(nm)		(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)
1	THT 3	25	630	2,4	1	250	0,6	150	4	250	4	69	250
2	THT 3	15	625	2,8	1,8	410	0,5	180	12	500	0,9	20	690
3	THT 5	10	620	4,2	0,92	220	1,1	230	4,4	145	1,5	24	350
4	THT 5	20	620	4,7	0,85	210	0,89	200	3,7	130	1,1	17	220
5	THT 5	30	625	11	0,13	59	0,015	40	0,33	11	0,8	17	120
6	THT 3	25	520	12	0,009	2	0,034	69	750	750	6,7	110	750
7	THT 5	20	520	11	0,016	4,2	0,055	99	900	900	10,1	150	900
8	THT 5	20	460	13	<0,001	0,46	1500	1500	1500	1500	17	120	1500
9	THT 5	20	460	7,9	0,004	0,78	3000	3000	3000	3000	25	300	3000
10	THT 5	20	460	5,8	0,005	1,6	4800	4800	4800	4800	36	470	4800
11	THT 5	20	460	4	<0,001	1,1	500	500	500	500	2	20	500
12	1206	120	455	0,2	0,015	4	5100	5100	5100	5100	21	340	5100
13	1206	120	455	1	0,004	1,2	1200	1200	1200	1200	7,4	110	1200
14	PLCC 2	120	465	1	0,015	3,4	2700	2700	2700	2700	8,2	170	2700
15	PLCC 2	120	465	5,3	0,002	0,7	1100	1100	1100	1100	2,9	80	1100
16	PLCC 6	120	460	2,3	0,017	2,9	1600	1600	1600	1600	19	180	1600
17	PLCC 6	120	460	6,1	0,003	1,1	1000	1000	1000	1000	13	110	1000
18	PLCC 6	120	460	12	<0,001	0,68	690	690	690	690	11	80	690
19	PLCC 6	120	465	3,5	0,01	2,6	1200	1200	1200	1200	15	130	1200
20	PLCC 6	120	465	7,8	0,003	1,5	820	820	820	820	10	91	820
21	PLCC 6	120	465	11	0,001	0,92	620	620	620	620	7,7	69	620
22	PLCC 6	120	470	1	0,016	5,5	3100	3100	3100	3100	35	350	3100
23	PLCC 6	120	470	3	0,007	3,0	1400	1400	1400	1400	17	150	1400
24	PLCC 6	120	470	10	0,002	1,0	740	740	740	740	9,1	82	740

Hodnoty měření jsou kvůli nepřesnostem měření zaokrouhleny na 2 platné číslice. Parametry vyzařovací úhel a střední vlnová délka jsou převzaty z datových listů jednotlivých LED, svítivost byla změřena kvůli špatné shodě údajů v datových listech s realitou. Pouzdra THT jsou všechna s kulatou hlavou. Ve výsledném prototypu je použita LED číslo 18.

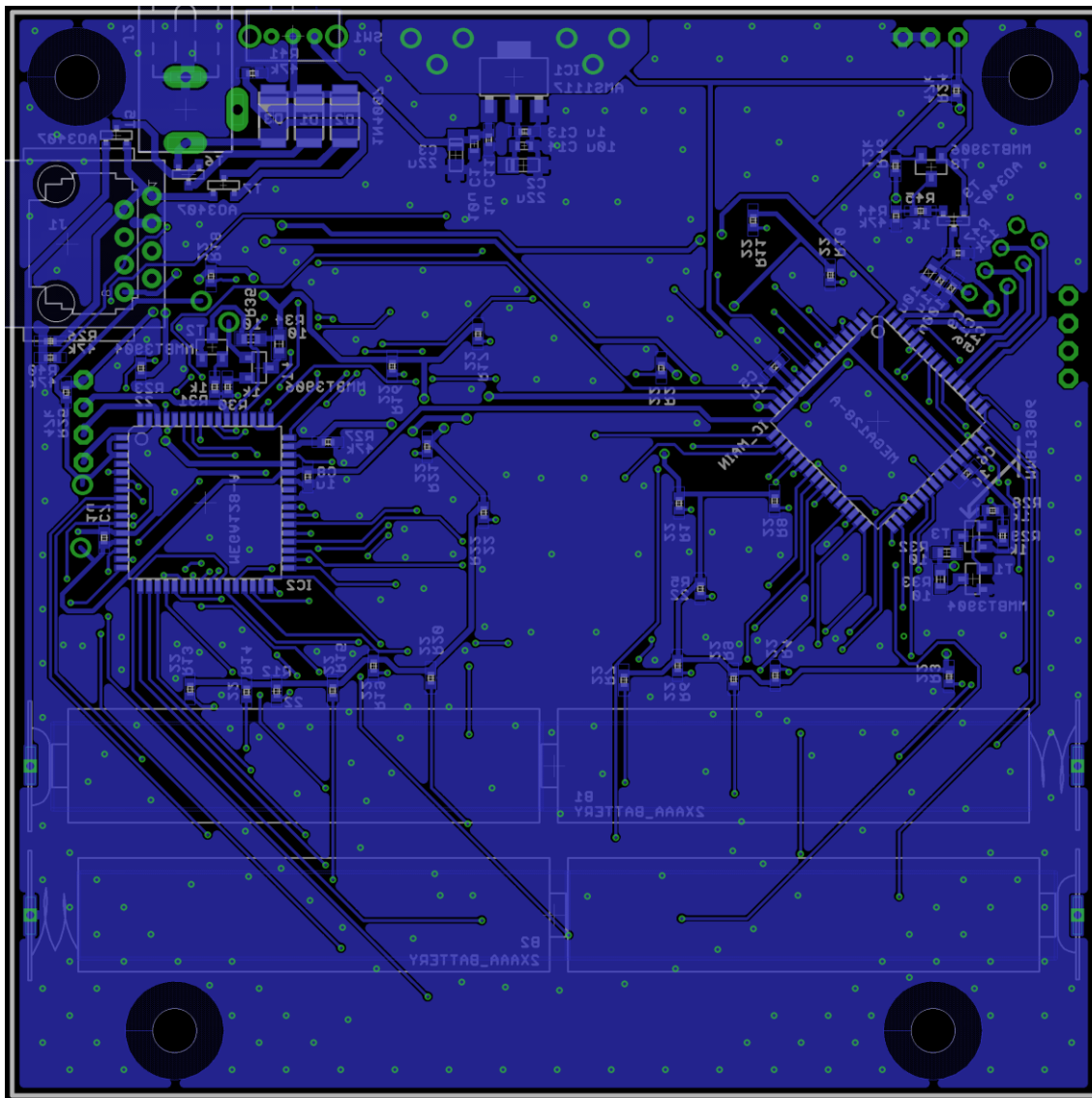
B NÁVRHY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 DPS modul terče, horní strana



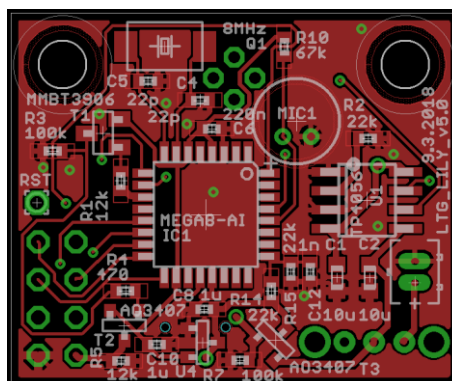
Měřítko M1,5:1. Skutečné rozměry DPS: 100 x 100 mm.

B.2 DPS modul terče, spodní strana



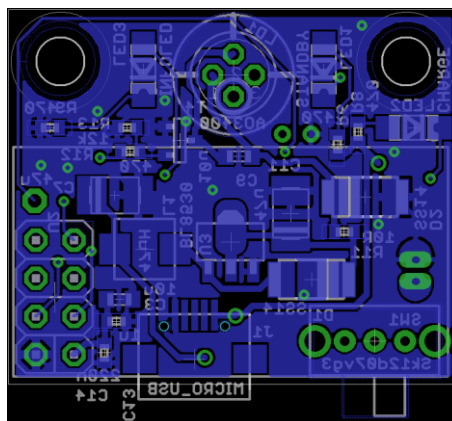
Měřítka M1,5:1. Skutečné rozměry DPS: 100 x 100 mm.

B.3 DPS modul zbraně, horní strana



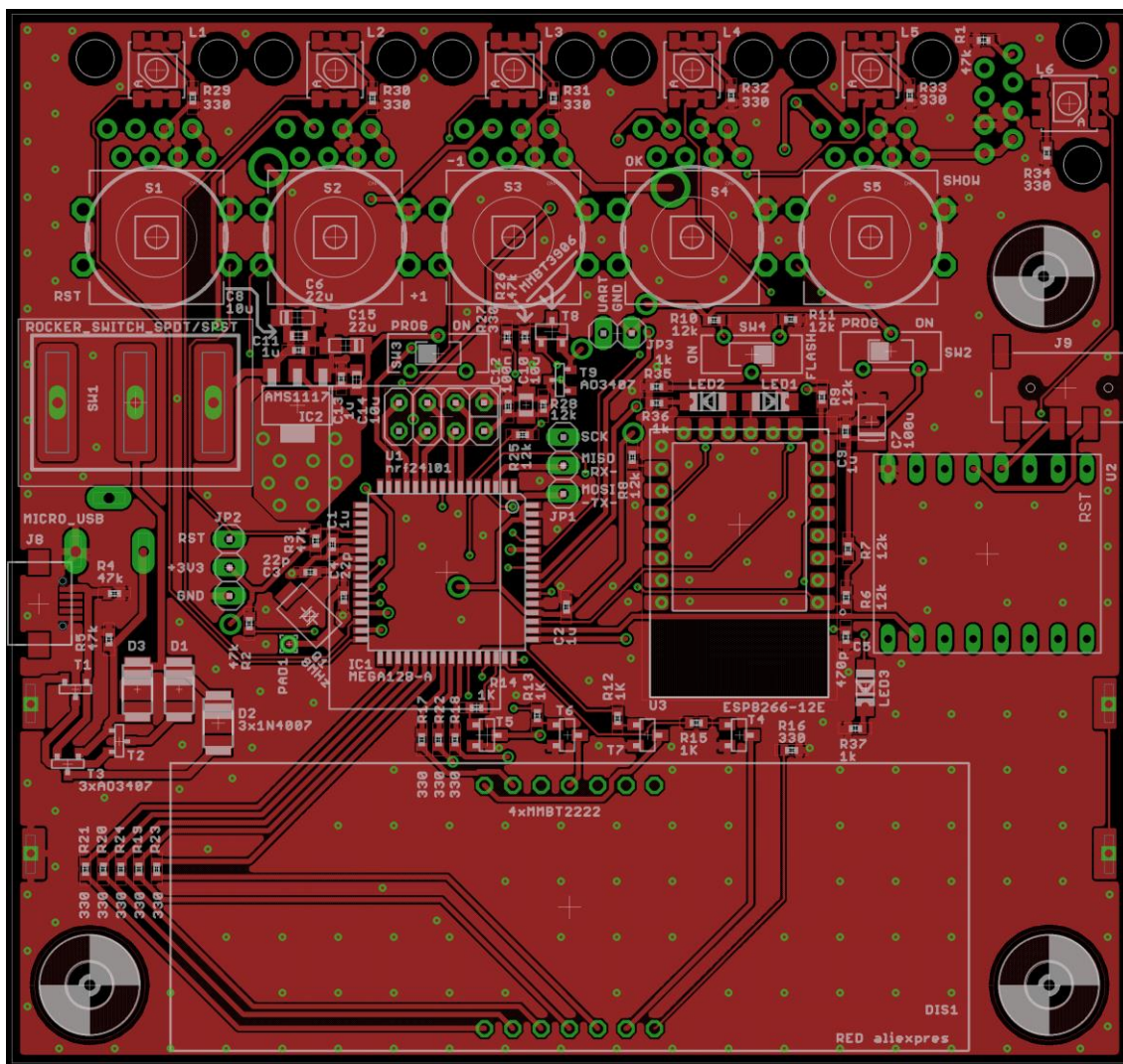
Měřítko M2:1. Skutečné rozměry DPS: 30 x 25 mm.

B.4 DPS modul zbraně, spodní strana



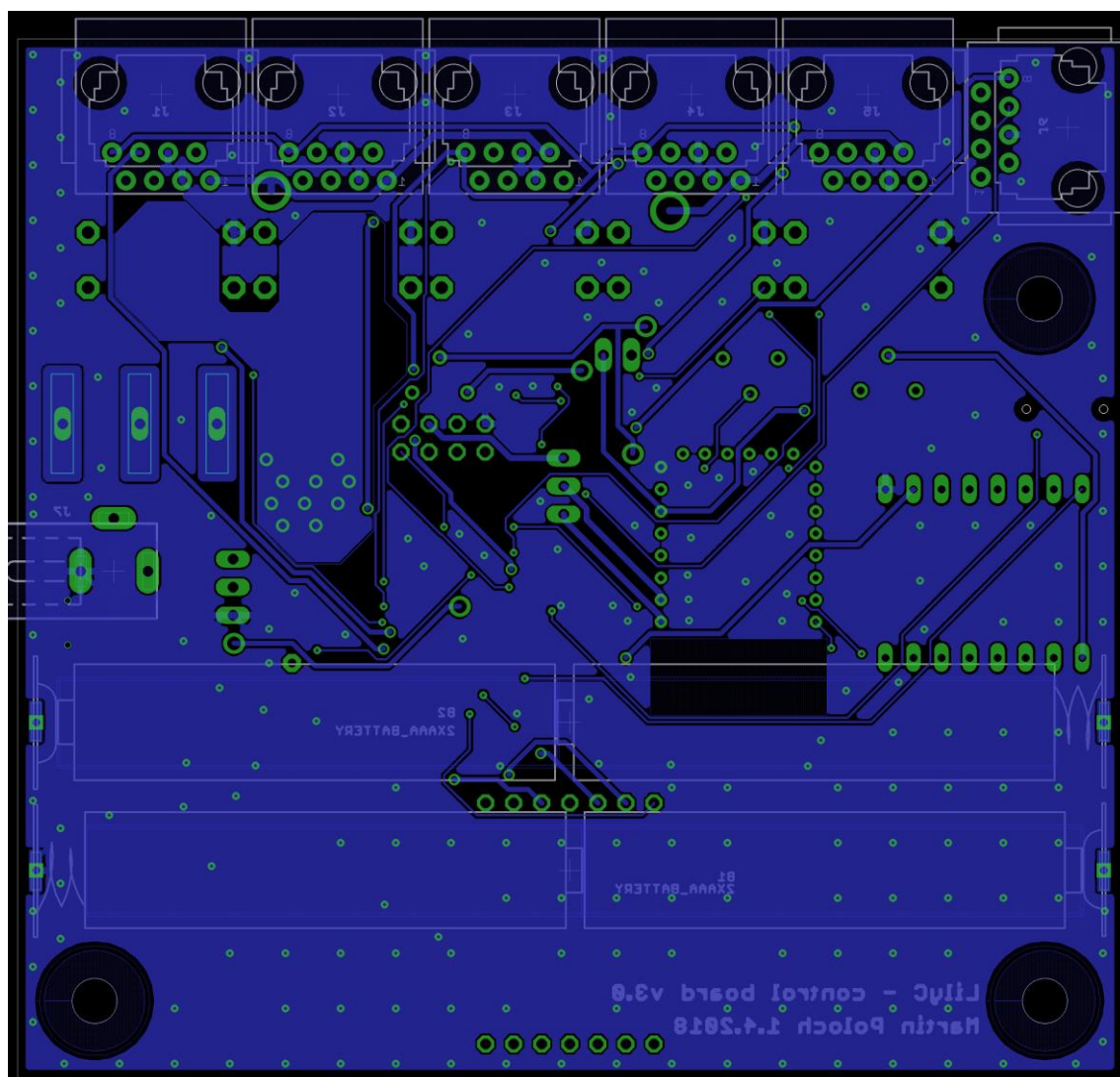
Měřítko M2:1. Skutečné rozměry DPS: 30 x 25 mm.

B.5 DPS kontrolní modul, horní strana



Měřítko M1,5:1. Skutečné rozměry DPS: 100 x 91 mm.

B.6 DPS kontrolní modul, spodní strana



Měřítko M1,5:1. Skutečné rozměry DPS: 100 x 91 mm.

C SEZNAMY SOUČÁSTEK

C.1 Modul terče

DPS LilyA v5.0			
Označení	Počet	Hodnota	Pouzdro
IC2, IC_MAIN	2	MEGA128-A	TQFP64
C15	1	100 nF	C0402
C5 - C8, C11, C13, C16	7	1 μ F	C0402
C1, C9, C14	3	10 μ F	C0603K
C2, C3	2	22 μ F	A/3216-18R
IC1	1	AMS1117	SOT223
T5 - T7, T9	4	AO3407	SOT-23
T1, T2	2	MMBT3904	SOT23-BEC
T3, T4, T8	3	MMBT3906	SOT23-BEC
R1 - R23	23	22 Ω	R0402
R24 - R27, R40, R41, R44	7	47 k Ω	R0402
R46, R47	2	12 k Ω	R0402
R28 - R31, R45	5	1 k Ω	R0402
R32 - R35	4	10 Ω	R0603
D1 - D3	3	1N4007	DO-214AC
L1 - L91	91	LED_PLCC6_5050V2	PLCC6_5050_V2
SW1	1	SLIDE_SWITCH	SLIDE_SWITCH_2
J1	1	ETHERNET_RJ45	RJ45
J2	1	Power jack	DCJ0303
B1, B2	2	2XAAA_BATTERY	AAA_BATTERY
U2	1	nRF24l01+	NRF24
J4	1	Pinheader 3x1	MA03-1
J3, J5	2	Pinheader 4x1	MA04-1

C.2 Modul do zbraně

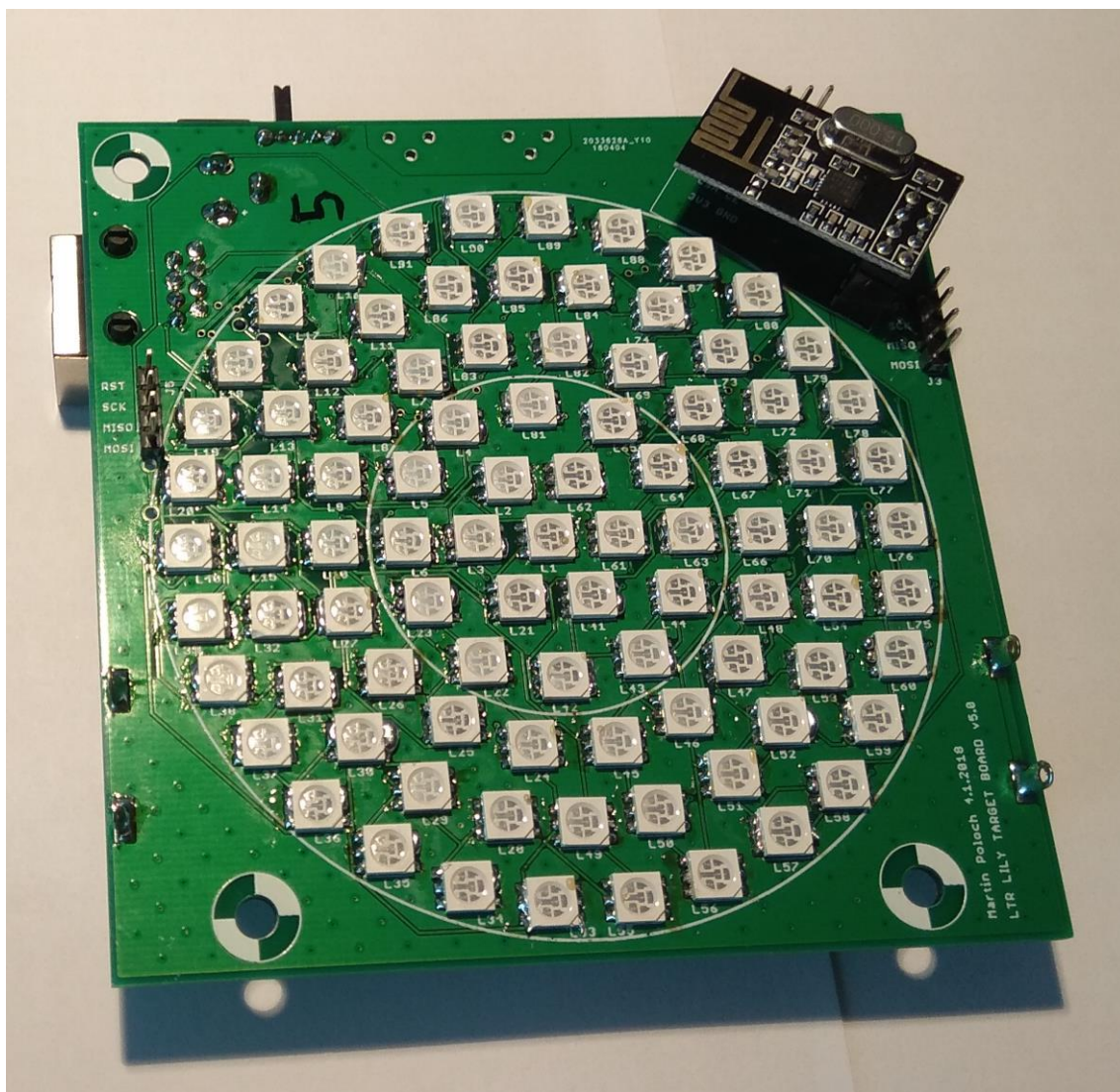
DPS LilyZ v5.0			
Označení	Počet	Hodnota	Pouzdro
IC1	1	Atmega8A	TQFP32-08
R1, R5	2+1	12 k Ω	R0402
R3, R7, R10	3	100 k Ω	R0402
R2, R14, R15	3	22 k Ω	R0402
R4	1+4	470 Ω	R0402
C1, C2	2+2	10 μ F	C0603K
C4, C5	2	22 pF	C0402
C6	1+1	220 nF	C0402
C8, C10	2+1	1 μ F	C0402
C12	1	1 nF	C0402
U1	1	TP4056	SO8
U4	1	XC6206P332MR	SOT-23
T1	1	MMBT3906	SOT23-BEC
T2, T3	2	AO3407	SOT-23
Q1	1	8MHz	CRYSTAL5032
LED1, LED2, LED3	3	LED červená	CHIPLED_1206
J1	1	MICRO_USB	MICRO_USB
T4	1	AO3400	SOT-23
R13	2+1	12 k Ω	R0402
R6, R8, R9, R12	1+4	470 Ω	R0402
R11	1	10 Ω	R0402
C14	1+1	220 nF	C0402
C13	2+1	1 μ F	C0402
C3, C11	2+2	10 μ F	C0603K
C7, C9	2	47 μ F	B/3528-21R
D1, D2	2	SS14	DO-214AC
L1	1	47 uH	4 X 3 mm
U3	1	BL8530	SOT89
J2	1	SJT 1.25 mm	SJT 1.25 mm
MIC1	1	MICROPHONE	6022
LD1	1	LASE_DIODE	TO18
SW1	1	Sk12d07vg3	SLIDE_SWITCH_2
U2	1	nrf24l01+	NRF24

C.3 Kontrolní modul

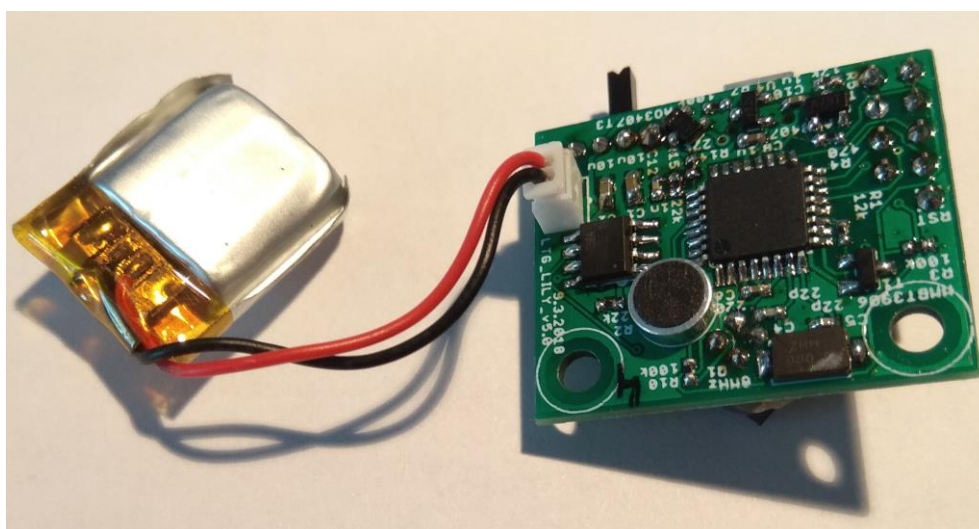
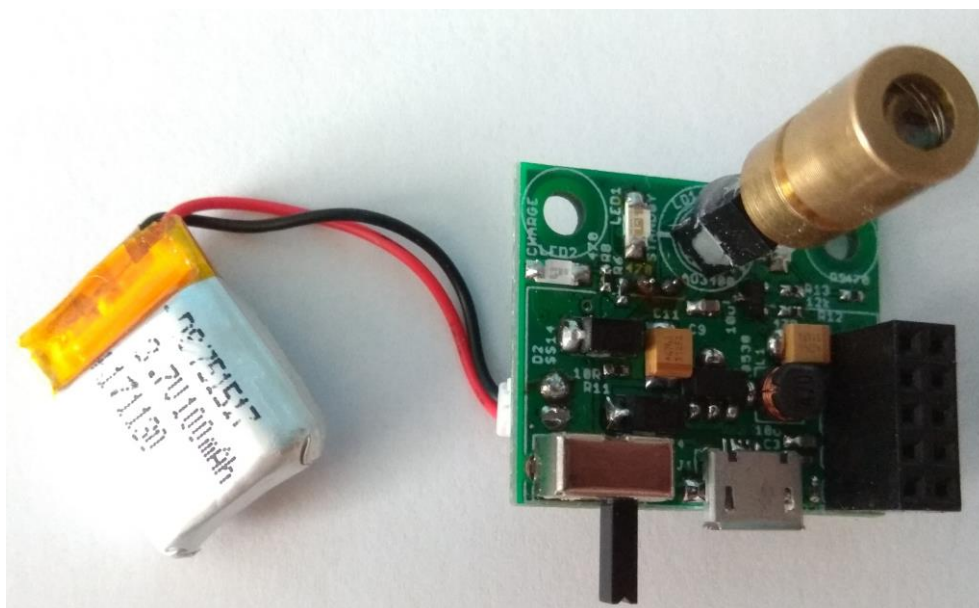
DPS LilyC v3.0			
RED	počet	Hodnota	Pouzdro
IC1	1	Atmega128A	TQFP64
IC2	1	AMS1117	SOT223
C12	1	100 nF	C0402
C1, C2, C9, C11, C13	5	1 μ F	C0402
C3, C4	2	22 pF	C0402
C5	1	470 pF	C0402
C8, C10, C14	3	10 μ F	C0603K
C6, C15	2	22 μ F	A/3216-18R
C7	1	100 μ F	B/3528-21R
Q1	1	8 MHz	CRYSTAL5032
R1 - R5, R26	5	47 k Ω	R0402
R6 - R11, R25, R28	6	12 k Ω	R0402
R12 - R15, R35 - R37	7	1 k Ω	R0402
R16-R24, R27, R29-R34	16	330 Ω	R0402
D1 - D3	3	1N4007	DO-214AC
L1 - L5	5	Zelená LED	PLCC6_5050
L6	1	Červená LED	PLCC6_5050
T1 - T3, T9	4	AO3407	SOT-23
T4 - T7	4	MMBT2222	SOT23-BEC
T8	1	MMBT3906	SOT23-BEC
LED1 - LED3	3	LED	1206
J8	1	MICRO_USB	MICRO USB
J9	1	audio konektor	JACK 3,5 mm
JP1, JP2	2	Pinheader 3 x 1	1X03
JP3	1	Pinheader 2 x 1	1X02
DIS1	1	Displej	DISPLAY 4 číslice
SW2 - SW4	3	K3-1235D-K1	SLIDE SWITCH 3
SW1	1	ROCKER_SWITCH	SPDT
U1	1	nrf24l01+	NRF24
U2	1	Zvukový modul	WTV020-SD-16P
U3	1	ESP8266-12E	ESP-12E
S1 - S5	5	tlačítko	tlačítko 12 mm
PAD1	1	Test point	1,6/0,8
J7	1	napájecí konektor	DCJ0303
B1, B2	2	2XAAA_BATTERY	AAA_BATTERY
J1 - J6	6	ethernet konektor	RJ45

D FOTOGRAFIE OSAZENÝCH DPS

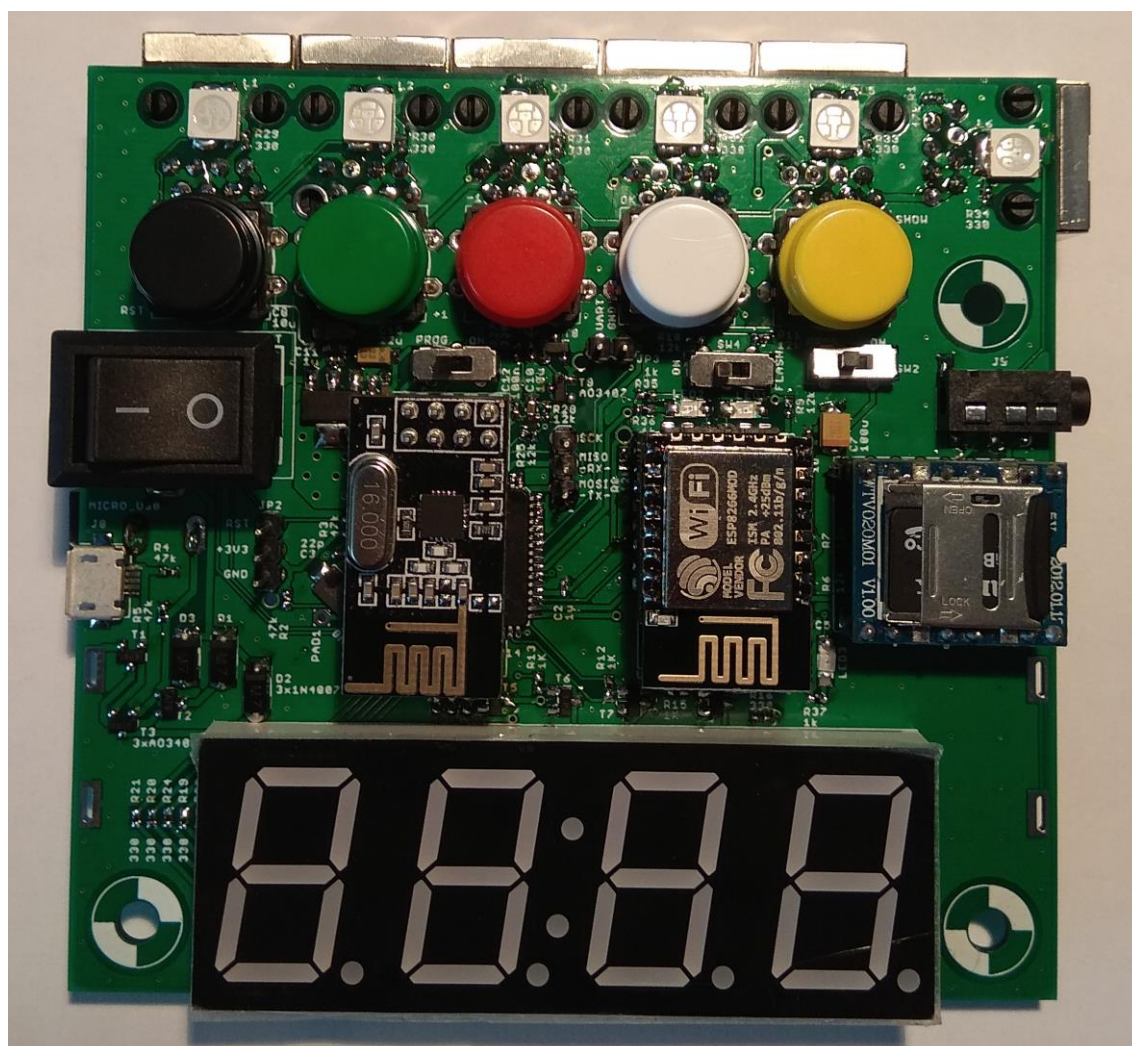
D.1 DPS terče, přední strana



D.2 DPS zbraně, přední a zadní strana

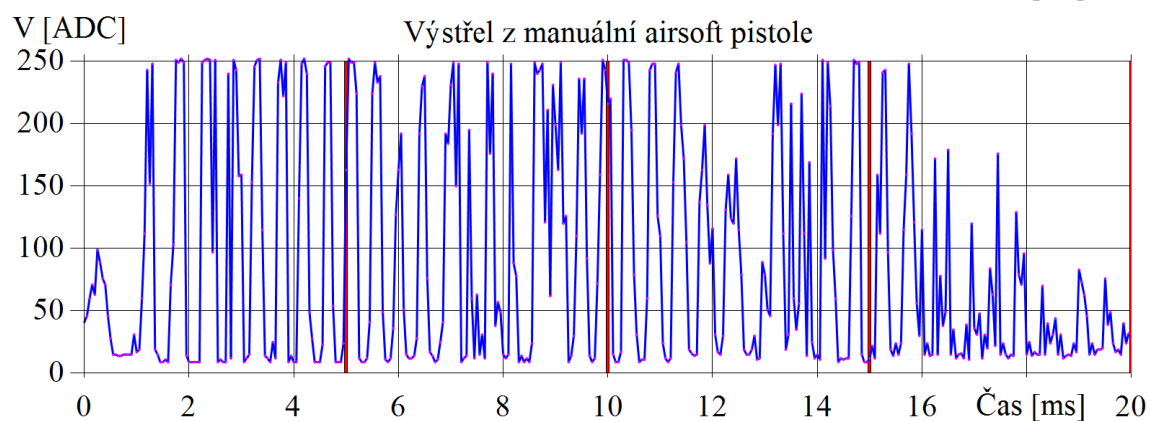
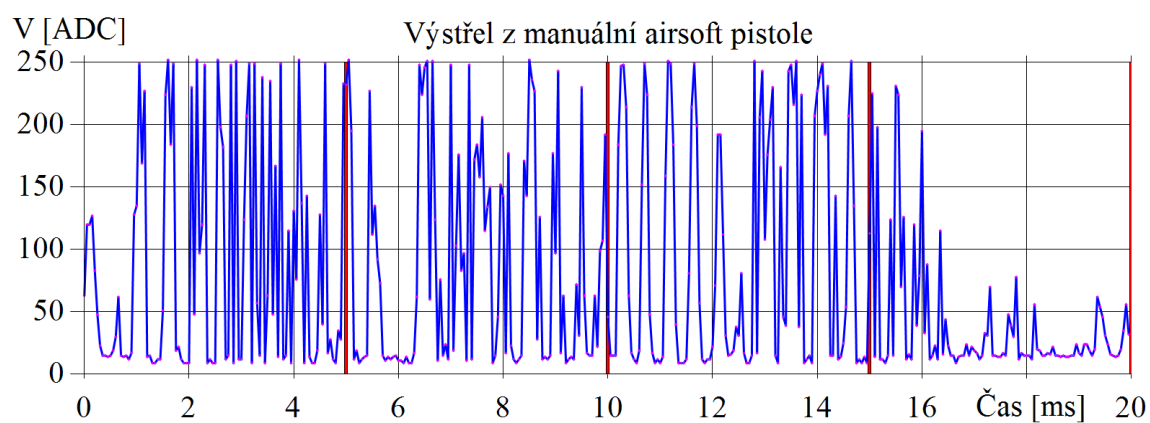
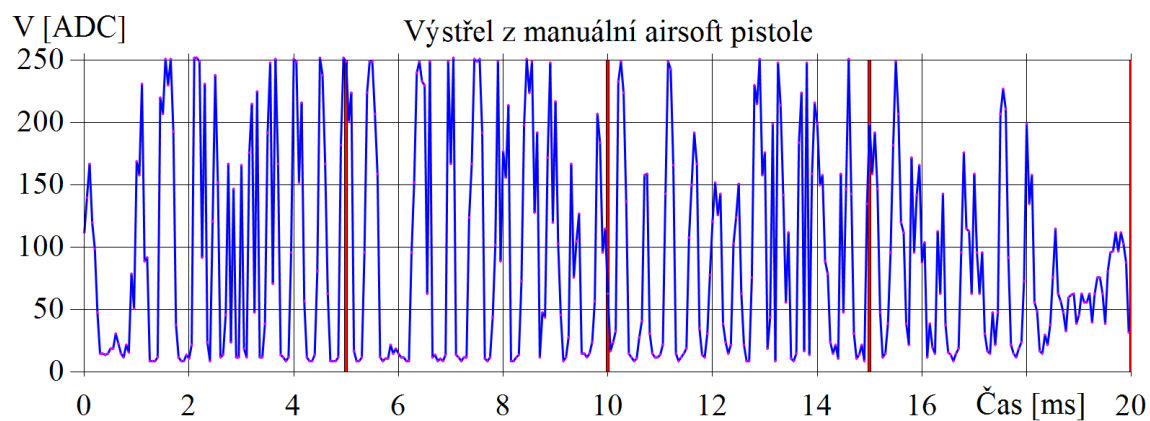


D.3 DPS kontrolního modulu, přední strana

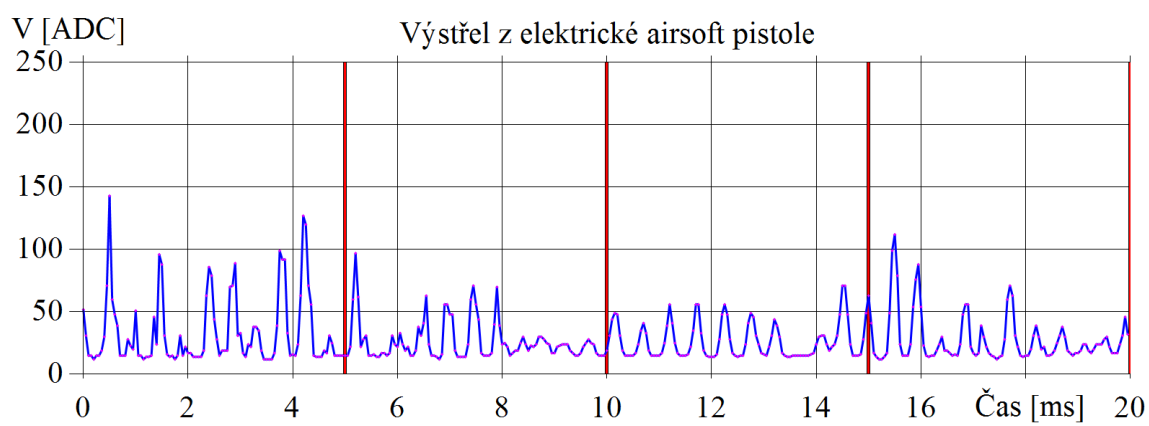
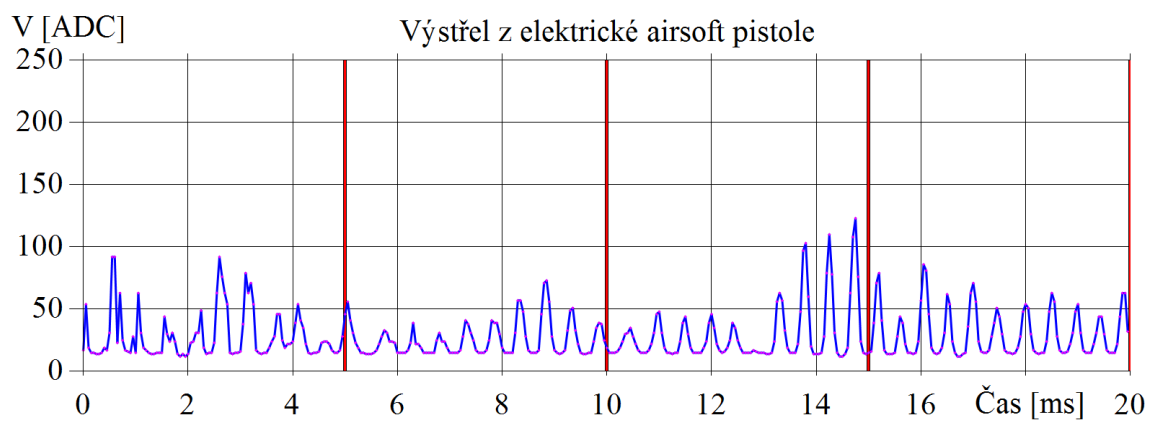
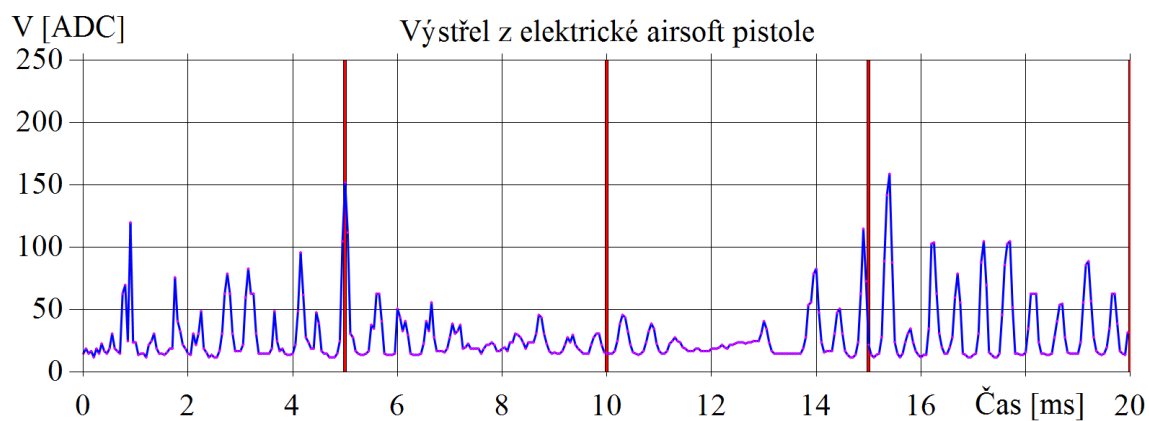


E MĚŘENÍ ZVUKOVÝCH VLN

E.1 Výstřely z manuální zbraně



E.2 Výstřely z elektrické zbraně



E.3 Nežádoucí jevy

